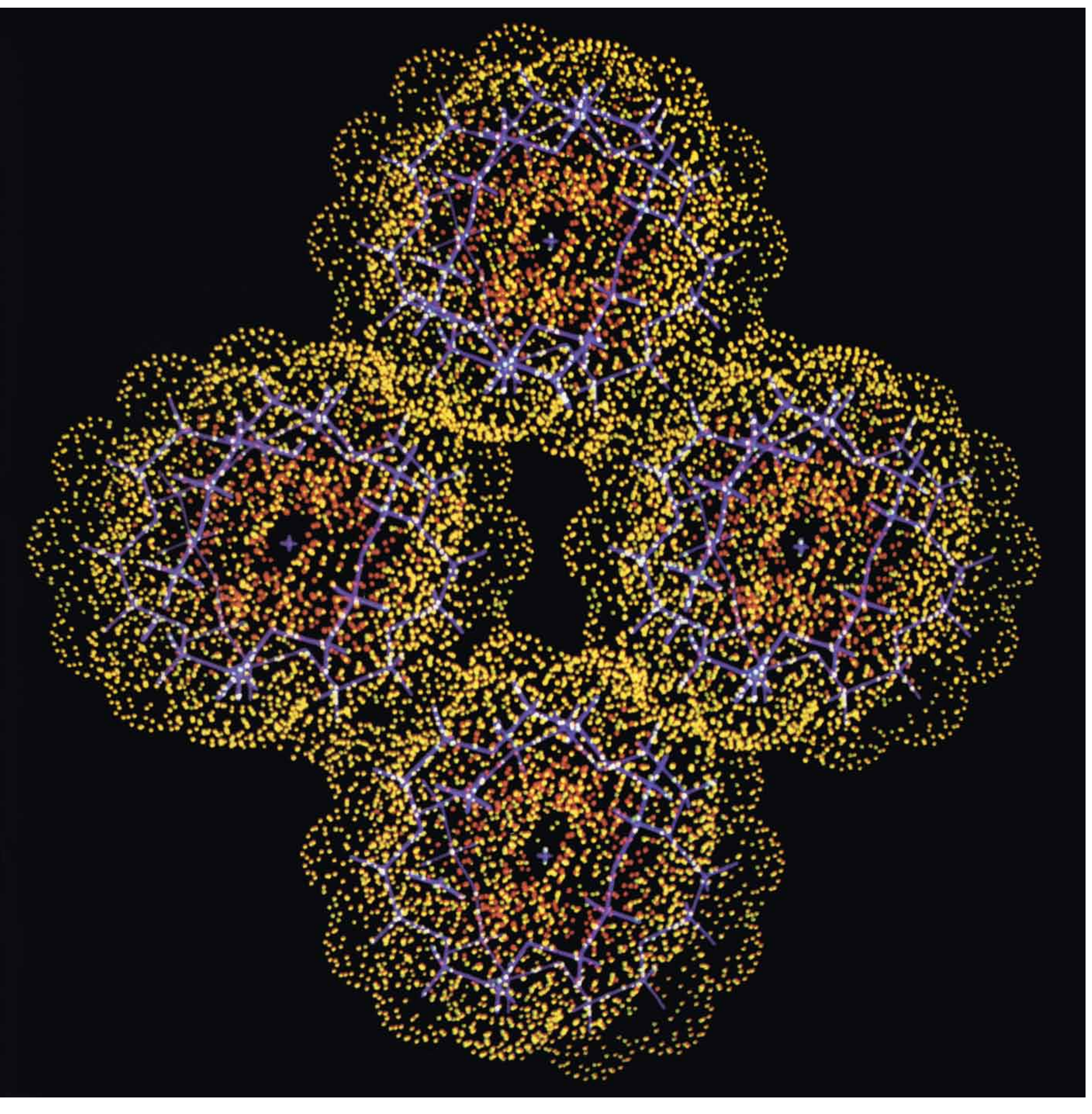
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ELECTRUROS

Noviembre 1987

450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 134
Noviembre 1987



INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

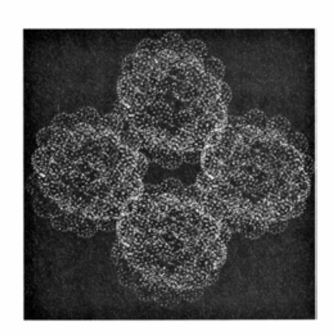
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Josep-Enric Llebot: *Defensa estratégica y armas de energía dirigida*; Manuel Puigcerver: *El grandioso desfile de las galaxias*; Santiago Torres Martínez: *Retrotranscripción*; Amando García Rodríguez: *Electruros*; Manuel Crespo: *Mimetismo vegetal*; Leonor Vernet: *Corredor swahili*; José M. García de la Mora: *Cómo aprenden las palabras los niños*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Teodoro Roca, Javier de Lorenzo, Arturo Morales y Luis Alonso



PORTADA

La ilustración de portada representa la estructura cristalina de un electruro, un material en el que electrones aislados ocupan los lugares que normalmente corresponden a los iones negativos (véase el artículo "Electruros", de James L. Dye en este mismo número). Los puntos definen las superficies de los átomos y los esqueletos azules representan las cadenas de carbono. Cada uno de los cuatro agregados redondos es un "bocadillo" ("sandwich") en el que dos moléculas neutras encierran a un átomo de cesio cargado positivamente. Entre los agregados existe un canal que comunica entre sí las cavidades que ocupan los electrones atrapados en la nueva clase de material cristalino.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.º J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada por James Kilkelly

Página	Fuente	Página	Fuente
15	Gabor Kiss	63	Breck P. Kent, Earth Scenes
16	White Sands Missile Test Range	64, 66	Spencer C. H. Barrett
17	Jon Brenneis	69	©Trustees of the Victoria and Albert Museum
18	Laboratorio Nacional Lawrence Livermore	70	Hank Iken
19	Gabor Kiss	71-72	Patricia J. Wynne
20	Jon Brenneis	73	M. C. Horton
22-23	Ofer Lahav, Instituto de Astronomía, Universidad de Cambridge	74-76	Museo Ashmoleano, Oxford
		81	Quesada/Burke
		82	James Kilkelly
24-25	Hank Iken	83	Quesada/Burke
26	David T. Wilkinson, Universidad de Princeton	85	Edward Bell
		89-93	F. Castillo, J Cárdenas y Ricardo Génova
27-30	Hank Iken		
33	Greg Monokian y Jef D. Boeke, Facultad de Medicina, Universidad Johns Hopkins	94	Plácido Navas, Dpto. Biología Celular, Universidad de Córdoba
34-38	Dana Burns	96	F. Castillo, J. Cárdenas y Ricardo Génova
45	James Kilkelly		
46	Andrew Christie	98-99	Edward Bell
47-48	James Kilkelly	100	Edward Bell
49-52	Andrew Christie	101	Andrew Christie
53	James Kilkelly	104	Michael Goodman
59	David Thompson, Oxford Scientific Films	105	C. C. Lockwood, Animals Animals (*arriba*); John Gosline, Universidad de Columbia Británica (*abajo*)
60-61	Tom Prentiss		
62	G.I. Bernard, Oxford Scientific Films	106-107	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

C. KUMAR N. PATEL y NICOLAAS BLOEMBERGEN ("Defensa estratégica y armas de energía dirigida") copresidieron el grupo de expertos reunido por encargo de la Sociedad Americana de Física para evaluar la viabilidad de las armas de energía dirigida. Patel, que encabeza la división de asuntos físicos y académicos de los Laboratorios AT&T Bell, es oriundo de la India y cursó el primer ciclo de carrera en la Universidad de Poona, diplomándose en 1958. Es licenciado (1959) y doctor (1961) por la Universidad de Stanford. Al poco de su incorporación a los Laboratorios Bell, en 1961, inventó el láser de dióxido de carbono. Bloembergen, que ocupa la cátedra Gerhard Gade de la Universidad de Harvard, ganó el premio Nobel de física de 1981. Nacido en Holanda, se doctoró en 1948 por la Universidad estatal de Leiden. En 1951 fue nombrado profesor asociado de Harvard y, en 1974, recibió la Medalla Nacional estadounidense de Ciencias.

ALAN DRESSLER ("El grandioso desfile de las galaxias") es astrónomo de los observatorios de Las Campanas y del Monte Wilson, de la Institución Carnegie de Washington. Formado en la Universidad de California en Berkeley, se doctoró en astronomía y astrofísica por la de California en Santa Cruz. Tras cinco años de colaborar en los Observatorios Hale, accedió a una plaza de número. Dressler se ha especializado en la observación óptica de otras galaxias y le atraen particularmente la formación y evolución galácticas.

HAROLD VARMUS ("Retrotranscripción") se interesó por los virus tumorígenos de ARN (hoy denominados retrovirus) trabajando, a finales de la década de 1960, como clínico adjunto en los Institutos Nacionales estadounidenses de la Salud. Enseña virología molecular en la Universidad de California en San Francisco, en una plaza dotada por la Sociedad Americana del Cáncer, tras haber comenzado su carrera con una licenciatura (1962) en literatura inglesa, que cursó en el Amherst College y en la Universidad de Harvard. Aquel mismo año de 1962 inició sus estudios de medicina en la Universidad de Columbia, que concluyó en 1966, ingresando entonces en el Hospital Presbiteriano y de la Universidad de Columbia, de Nueva York, para realizar el internado. En 1968, Varmus se trasladó a los Institutos Nacionales de la Salud y, dos años después, a la Universidad de California en San Francisco.

JAMES L. DYE ("Electruros") dirige el departamento de química de la Universidad estatal de Michigan, en cuyo claustro docente se incorporó tras cursar el primer ciclo universitario en el Gustavus Adolphus College y licenciarse (1953) por la Universidad estatal de Iowa. En 1975 y 1976 disfrutó de una beca Guggenheim y otra Fulbright de investigación científica en la Universidad de Estrasburgo; asimismo, durante parte de 1982 y de 1983 colaboró, en un año sabático, con los Laboratorios Bell. Dye ha dirigido el Centro de Investigación de Materiales Fundamentales de la estatal de Michigan y es miembro de la Sociedad Americana de Química.

SPENCER C. H. BARRETT ("Mimetismo vegetal") es profesor asociado de la Universidad de Toronto. Se especializó en la evolución de los sistemas vegetales de fecundación y en la genética de las cizañas durante una expedición a Swazilandia, que realizó para licenciarse en botánica agrícola. Diplomado en ciencias en 1971 por la Universidad de Reading, dedicó un año a la recolección de semillas para un programa de conservación de los recursos genéticos auspiciado por la Royal Society de Londres. Se trasladó luego a la Universidad de California en Berkeley, que le recibió de doctor en 1977. Desde entonces, Barrett ha permanecido en Toronto.

MARK HORTON ("Corredor swahili") ha dirigido, desde 1980, numerosas expediciones a Shanga y Zanzíbar. Formado en la Universidad de Cambridge, por la que se doctoró en 1984, se dedica a la investigación en la Universidad de Oxford. Además de sus excavaciones africanas, financiadas por el Instituto Británico de Africa Oriental, Horton ha explorado yacimientos de Sri Lanka y América Central.

GEORGE A. MILLER y PATRICIA M. GILDEA ("Cómo aprenden las palabras los niños") empezaron a colaborar cuando Gildea trabajaba de postgraduada en la Universidad de Princeton. Actualmente, Miller ocupa la plaza de psicología James S. McDonnell, de Princeton, a cuyo claustro docente pertenece desde 1979. Tras cursar estudios en la Universidad de Alabama, se doctoró por la de Harvard en 1946. Trabajó como becario de investigación en el laboratorio psicoacústico de Harvard hasta 1948, cuando se le nombró profesor ayudante de psicología. Entre 1951 y 1955 enseñó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts; en 1955 volvió a Harvard donde, junto con Jerome S. Bruner, fundó, en 1960, el Centro de Estudios Cognitivos. Miller se trasladó a la Universidad Rockefeller en 1968 y, a Princeton, 11 años después. Gildea colaboró en el "proyecto diccionario" durante sus trabajos de postdoctorado, realizados en 1984 en Bell Communications Research. En la actualidad enseña psicología en la Universidad Rutgers. Cursó la carrera en el Sarah Lawrence College y en Princeton y se interesó por el desarrollo del vocabulario durante la preparación de su tesis de doctorado, que defendió en Princeton en 1984. Se trasladó a Rutgers en 1985.

FRANCISCO CASTILLO y JACOBO CARDENAS ("Fijación biológica del nitrógeno") obtuvieron el grado de doctor en ciencias por la Universidad de Sevilla en los años 1975 y 1972, respectivamente. Desde el comienzo de su formación científica han trabajado en diversos aspectos del metabolismo del nitrógeno inorgánico, sobre todo por lo que respecta a la fijación de nitrógeno, tanto en centros universitarios españoles (Universidades de Sevilla y Córdoba) como de los Estados Unidos (Universidad de Purdue) y Alemania Federal (Universidad de Erlangen). En la actualidad desarrollan su labor docente e investigadora como catedráticos de bioquímica y biología molecular de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Córdoba, donde dirigen diversas líneas de investigación sobre el metabolismo del nitrógeno y el carbono en algas verdes y bacterias fototróficas.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Diego García de Palacio publicó en México su *Instrucción náuthica, para el buen uso, y regimiento de las naos, su traça, y gobierno conforme a la altura de México*. Pertenece a la serie de grandes tratados españoles del siglo XVI que ofrecieron una exposición sistemática del nuevo "arte de navegar" basado en la astronomía e incluye, además, el primer texto sobre construcción naval impreso en el mundo.

Nacido en el seno de una familia cántabra de marinos, García de Palacio asoció la dedicación a la navegación, principalmente en el área del Pacífico, con la formación jurídica de carácter universitario. Trabajó al servicio del Consejo de Indias y en 1572 fue nombrado fiscal y poco después oidor de la Audiencia de Guatemala, puesto que desempeñó hasta 1579. En esta época dirigió una *Carta al Rey sobre la conquista y pacificación de las islas Filipinas* (1578), en la que proponía terminar a sus expensas la ocupación de las mismas, lo que implica, según ha destacado Ursula Lamb, que entonces poseía una fortuna considerable. En abril del año siguiente dirigió otra *Carta* al monarca desde el Puerto de Realejo en Nicaragua, acerca de los daños causados por una incursión de Francis Drake. En 1580 pasó a ocupar el cargo de alcalde del crimen en la Audiencia de Nueva España y también consiguió el grado de doctor en derecho por la Universidad de México, de la que llegó a ser rector durante 1582. La brillante carrera de García de Palacio fue truncada en febrero de 1589 por una "ejecutoria" del Consejo de Indias, que le suspendió de su oficio de oidor y le condenó a una grave sanción económica por los abusos y faltas que había cometido en el desempeño de su cargo. Completamente arruinado, falleció en Santander en 1595.

Aparte de las dos cartas citadas, García de Palacio escribió varios informes, entre los que destaca uno dedicado a la península del Yucatán, que contiene una célebre descripción de la localidad maya de Copán. Sin embargo, debe principalmente su relieve histórico a que publicó dos importantes tratados de ciencia aplicada: unos *Diálogos militares* (1583) y la *Instrucción náuthica* (1587).

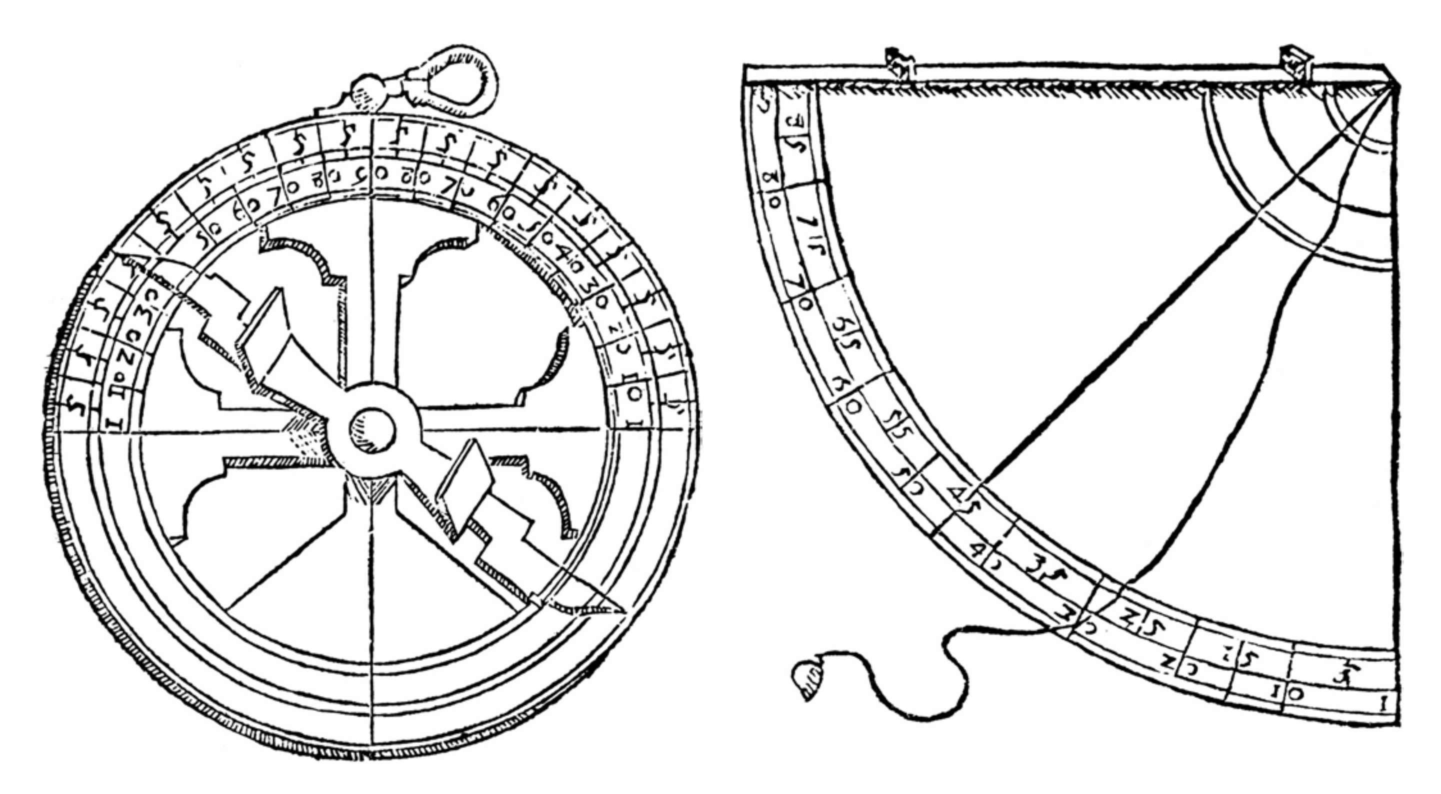
Los *Diálogos militares de la formación e información de personas, instrumentos y cosas necessarios para el buen uso de la guerra* fue el principal texto de ingeniería militar editado en América durante el siglo XVI. Como muchas obras científicas y técnicas de la época está redactado en forma de diálogo, concretamente entre un soldado vizcaíno que había participado en las guerras de Italia y otro cántabro que lo había hecho en la conquista de América. Comprende cuatro "libros" en los que se expone, entre otras materias, los fundamentos matemáticos del "arte militar", las técnicas de fabricación de pólvora y armas —en especial la construcción y fundición de piezas de artillería— y problemas de balística, sobre todo los tocantes a la relación entre el ángulo de tiro y la distancia alcanzada por el proyectil.

La *Instrucción náuthica* también está dividida en cuatro "libros" y expuesta como un diálogo entre "un vizcayno y un montañés". Su contenido se ajusta básicamente al modelo de tratado sobre el "arte de navegar" procedente de la Casa de la Contratación, de Sevilla, que había culminado en los publicados por Pedro Medina (1545) y Martín Cortés (1551), que juntos alcanzaron en menos de un siglo cuarenta y dos ediciones en cinco idiomas. De esta forma, se ocupa de la "esfera celeste y terrestre", de los principales instrumentos náuticos (astrolabio, cuadrante, ballestilla y brújula o "aguja de marear"), de la declinación magnética, de las "cartas de marear" y de las tablas y cálculos astronómicos utilizados por los pilotos. Las tablas, como indica el título de la obra, están calculadas para la latitud de la ciudad de México y destinadas fundamentalmente a la navegación por el Pacífico.

Al contenido habitual de los tratados de "arte de navegar" de la época, la *Instrucción* añade dos novedades de gran interés: un *Vocabulario de los nombres que usa la gente de la mar, en todo lo que pertenesce a su arte*, primer diccionario de náutica impreso, y, sobre todo, el amplio estudio sobre "la cuenta y traça que ha de tener cualquier nao", primer texto sobre construcción naval publicado en el mundo, como hemos adelantado.

Para situar la contribución del santanderino conviene recordar que, como dice Guillén Tato, "Por entonces privaban las naos de 400 toneladas y García de Palacio trata largamente de su fábrica, dando reglas que se apartan de la clásica del *as, dos, tres*", es decir, manga doble y eslora triple que el puntal. Se dirige a "los que no saben filosofía ni letras (...) por ser tales los que a lo más común profesan esta arte (...). Para declaración de lo que ha de decir, y v.m. quiere, conviene poner la manera de medir y los nombres de algunos maderos y palos más comunes, para mejor inteligencia. Hácese pues la cuenta de las naos, generalmente por codos, que dos pies o dos tercias de vara hacen un codo, y por éste se cuenta y pide cualquier navío al artífice, señalando que ha de tener tantos codos de quilla, que es el largo, y tantos de puntal, que es el alto, y tantos de manga, que es el ancho. Los maderos fundamentales de cualquier nao son: codaste, quilla, roda, estamenaras, barraganetes, forcaces, cinglones, baos, latas, dumentes, cintas, madres, corbatones, corbatones de revés, corbatones de gorja; hay también contraquillas, contradurmentes, aletas, llaves, borne para el tablazón del costado y tablas para las cubiertas y cámaras; hay trancaniles, tacadas y otros particulares, como mástiles, masteleos y entenas. Pero, viendo al propósito (...) me paresce que así para la guerra como para mercancía, y para porte y tamaño conviniente de una nao, bastan cuatrocientas toneladas (...).

"Por manera que una nao de cuatrocientas toneladas (que dos pipas hace una) ha de tener treinta y cuatro codos de quilla, desde el codaste de popa al codillo de proa, y de manga dieciséis que es casi la mitad de la quilla; y no habiendo de llevar xareta, tendrá el navío desde porte once codos y medio de puntal, que es el tercio de la dicha quilla; porque habiendo de tenerla (por lo que ésta ha de subir) será necesario añadir otros tres codos, que por todos serán catorce y medio. Y con esto también se ha de saber que el hueco y rosca desta nao se divide en cubiertas, que en una casa llaman altos. Para la primera, contando desde la quilla hasta lo alto, se asientan unos tablones gruesos por la parte de dentro que llaman durmentes; y sobre éstos se ponen y asientan ciertos maderos algo gruesos, que llaman baos; y éstos hacen la primera división, y han de estar en cuatro codos y medio de puntal, que es el altura de



(1 y 2) Dos de los instrumentos estudiados en la Instrucción náuthica *(1587), de Diego García de Palacio: el astrolabio y el cuadrante.*

tres pipas. La segunda, que llaman primera cubierta, se forma y hace de la mesma manera; y estará ésta en tres codos de los dichos baos, que es el altura que han menester dos pipas. La segunda, y que llaman puente y es la tercera división, tendrá otros tres codos, y todos harán diez y medio, y ocuparán el grueso de los baos; y hasta las dos cubiertas serán once, sin otros tres que se han de añadir, si la nao hubiere de llevar xareta, como queda dicho: que es sobre la cual se marearán las velas y gobiernan los mareantes; y debaxo della, están los pasajeros o gentes de guerra.

"La cuenta que v.m. ha hecho para el porte que se presupone está buena, y por ella se puede añadir o quitar en mayor o menor número y cantidad. Pero no entiendo que basta lo dicho, si no se dan más claras reglas para su proporción, pues como v.m. sabe, de abrir o cerrar más de lo necesario cualquier nave, o de tener el lanzante, delgados y maderos de cuenta, raseles y escora en su punto, salen de mal gobierno y con otras malas condiciones, de que suelen venir muchas pérdidas, daños y muertes".

García de Palacio incluye una serie de planos, los primeros en su clase que llegaron a imprimirse, en los que se detallan minuciosamente las medidas. También se ocupa ampliamente de las "personas y oficios de la nao":

"Será el primer personaje de la nao su capitán, y después de él, el maestre, piloto, contramaestre, guardián, despensero, carpintero, calafate, barbero, condestable y lombarderos, marineros, grumetes y pajes".

En los problemas científicos y técnicos, la máxima autoridad era el piloto:

"Debe ser de buena edad y de mucha experiencia, y que haya hecho y tenido dichosos sucesos en el mar; si se pudiese hallar, que sepa astrología, matemática y cosmografía, pues hará muchas ventajas al que no lo supiere; cuando no lo haya, debe ser cierto en la altura del astrolabio, ballestilla y cuadrante, lunar y mareas, y conocimiento de tierra, y de la sonda y de la buena fantasía para echar punto en su carta (...) ha de tener buenos instrumentos, que son carta de marear, compases, astrolabio que pese doce libras y esté experimentado, ballestilla de sesenta, veinte hasta número de ocho, dos relojes de los de Lisboa, dos pares de agujas de marear, ampolletas (relojes de arena) de Venecia, candil de cobre, algodón para mechas y cien brazas de sonda alquitranada, con seis libras de plomada".

Conviene también que anotemos las funciones del carpintero, el calafate y el condestable:

"El carpintero (...) ha de saber el gálibo (forma de repartir la cuenta de cualquier embarcación que se fabrica) necesario para hacer si fuere necesario un batel, una chalupa y otras cosas que se ofrescen.

"El calafate (...) ha de tener especial cuidado de la bomba, concertalla y tenella siempre a punto como cosa que es de su cargo, y recorrer (...) las cubiertas, las toldas, las amuradas y los costados, de manera que esté estanca en todas partes.

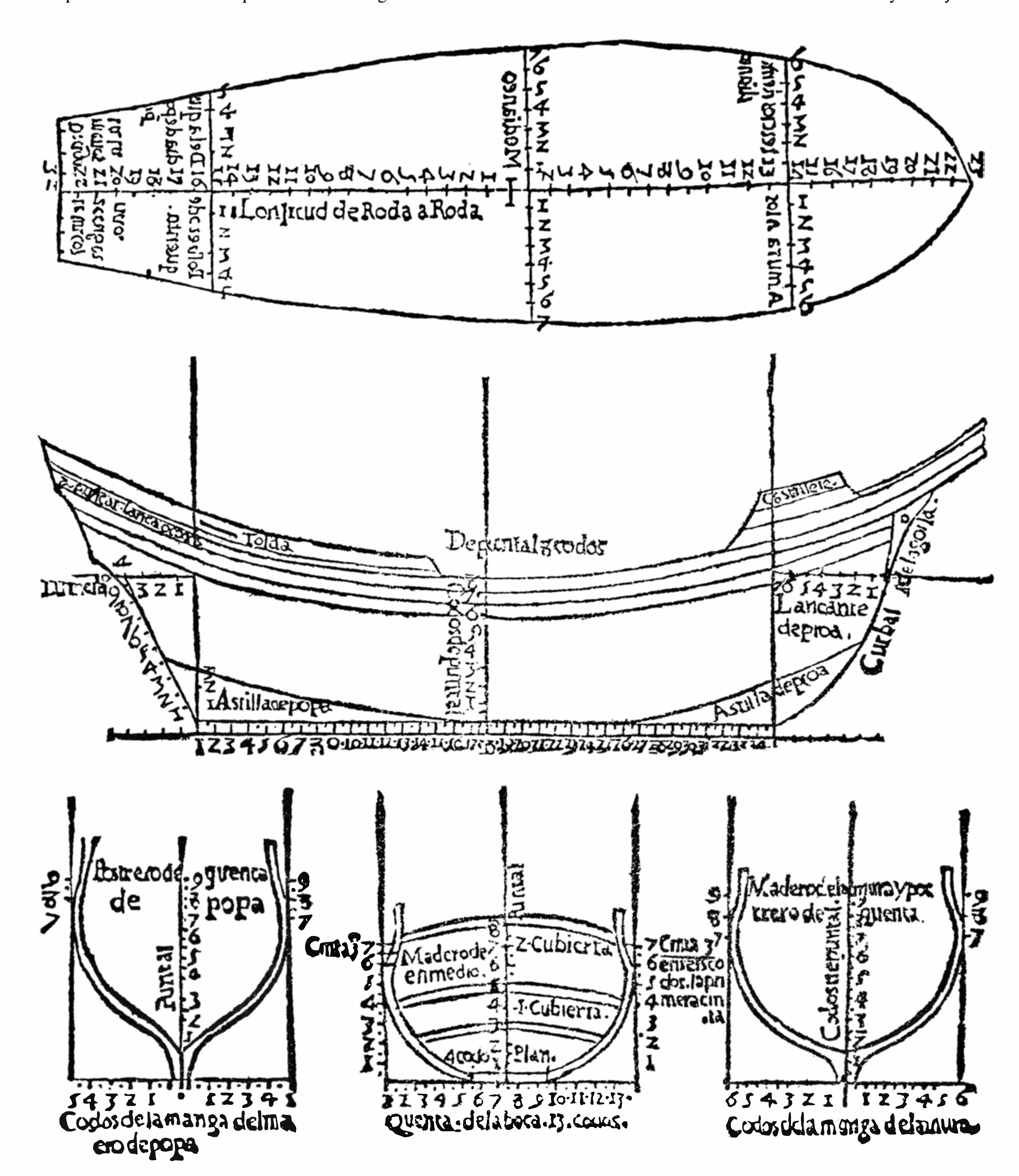
"El condestable, a cuyo cargo está la artillería y municiones, hacer ingenios de fuego y ordenar a los artilleros a lo que han de acudir (...) ha de saber hacer pólvora y afinarla hecha bombas de fuego, alcancías, granadas, piñas, dardos, flechas y bolas de fuego artificial y, para las piezas de bronce (...) sus alcatraces y otras invenciones con que ofender al enemigo (...) y en el borde tendrá sus canceles para tener en ellos todos los artificios que se han dicho, sus botafogos, las medidas de las bocas de las piezas, compases, nivel, mecha, aguja para cebar, barrena para sacar estopa y escoria del tiro (...). Para dar fuego a las piezas, se ha de conformar con el piloto, para que mande arriba (echar la popa hacia el viento, cuando la proa va mucho al barlovento) o ir de loo (encaminar el navío) adonde va el viento, y se haga la puntería donde convenga, sin que ningún cañonazo se tire en duda si acertará o no".

El barbero, por su parte, era un barbero-cirujano, nivel inferior de las ocupaciones médicas del siglo XVI:

"El barbero y cirujano que ha de llevar la nao conviene que sea experimentado y que tenga alguna práctica en las enfermedades que en el mar se suelen ofrescer".

El arqueo de un barco se medía en la época en "toneladas" que eran "la medida del sitio, en que caben dos toneles, que sirven para regular el buque cabida del navío".

La "cantidad de dos pipas de vino", como dice el propio García de Palacio, equivalía a poco más de seiscientos kilogramos. La *Instrucción náuthica* informa que "una nao de quinientas hasta setecientas toneladas" (entre 300 y 450 de las actuales) necesitaba un centenar de personas, de los cuales cincuenta eran marineros y treinta grumetes, es decir, "mozos de navío que acuden a todas las obras y trabajos".



(3, 4 y 5) Ejemplos de las medidas para la construcción naval que incluye el "libro" de la Instrucción náuthica *dedicado a la "cuenta y traça que ha de tener cualquier nao", primer texto sobre el tema impreso en el mundo.*

Defensa estratégica y armas de energía dirigida

Los copresidentes del grupo de especialistas de la Sociedad Americana de Física resumen su informe técnico sobre la aplicación de nuevos armamentos en la defensa estratégica

C. Kumar N. Patel y Nicolaas Bloembergen

En noviembre de 1983, unos ocho meses después de que el presidente Reagan emplazara a la comunidad científica estadounidense a colaborar en el desarrollo de un sistema "que intercepte y destruya los misiles balísticos intercontinentales antes de que lleguen a nuestro suelo", la Sociedad Americana de Física encargó un estudio que evaluara el estado actual de las armas de energía dirigida. Publicado por fin la pasada primavera, el trabajo se centra en el análisis de la apliación de láseres y haces de partículas en la defensa estratégica. El comité, formado por 17 miembros y presidido por los autores, se propuso elaborar un informe que sirviera como punto de referencia técnica en posteriores debates sobre la viabilidad de la "coraza espacial" imaginada por los impulsores de la Iniciativa de Defensa Estratégica (IDE), programa nacido a instancias del presidente norteamericano. El presente artículo se basa en tal informe.

Los miembros de la comisión se seleccionaron en razón de su experiencia en los campos científicos y técnicos de mayor interés para las armas de energía dirigida. Procedían de numerosos laboratorios universitarios, públicos o privados, y muchos de ellos participan de forma activa en el desarrollo de armamento nuclear o de las tecnologías en las que se apoya. En la prepararión de este estudio hemos tenido acceso a información confidencial. La publicación del informe se retrasó siete meses, por la revisión a que fue sometido por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, pese a lo cual el material eliminado ha sido mínimo. Las supresiones más significativas se refieren a la vulnerabilidad de los sistemas defensivos y a las posibles contramedidas.

¿Qué hemos encontrado? Comparadas con la extensión del informe (424 páginas) nuestras conclusiones son breves. Citando el propio trabajo: "Aunque en las últimas dos décadas se ha progresado considerablemente en muchas tecnologías AED [armas de energía dirigida], el Grupo de Estudio detecta lagunas importantes en el conocimiento científico e ingenieril de muchos aspectos asociados al desarrollo de esas tecnologías. Su resolución satisfactoria resulta decisiva para extrapolar hasta los niveles de rendimiento que exige todo sistema de defensa balístico eficaz. No se dispone hoy de información suficiente para decidir si tales extrapolaciones pueden o no alcanzarse. La mayoría de los componentes principales del sistema AED deben mejorarse varios órdenes de magnitud. Dada la interrelación de los diversos componentes, las mejoras han de efectuarse manteniendo la coherencia mutua. Estimamos que, incluso en la mejor de las circunstancias, la adquisición de los conocimientos técnicos necesarios para tomar una decisión informada sobre la eficacia potencial de los sistemas de armas de energía dirigida requerirá,

Informe del grupo de estudio de la Sociedad Americana de Física sobre "Ciencia y Tecnología de las Armas de Energía Dirigida"

Nicolaas Bloembergen, *copresidente*,
Universidad de Harvard
C. Kumar N. Patel, *copresidente*,
Laboratorios AT&T Bell
Petras Avizonis
Laboratorio de Armamento de las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos
Robert Clem
Laboratorios Nacionales Sandia
Abraham Herzberg
Universidad de Washington
Thomas Johnson
Academia Militar de los Estados Unidos
Thomas Marshall
Universidad de Columbia
Bruce Miller
Laboratorios Nacionales Sandia
Walter Morrow
Laboratorios Lincoln, Instituto de Tecnología de Massachusetts
Edwin Salpeter
Universidad de Cornell
Andrew Sessler
Laboratorio Lawrence Berkeley
Jeremiah Sullivan
Universidad de Illinois
James Wyant
Universidad de Arizona
Amnon Yariv
Instituto de Tecnología de California
Richard Zare
Universidad de Stanford

L. Charles Hebel, Xerox Corporation
Alex Glass, KMS Fusion, Inc.

La historia del estudio es larga. Encargado el 20 de noviembre de1983 por la Sociedad Americana de Física (APS), no se publicó hasta unos 21 meses después ("el período de gestación de un elefante", en palabras de Patel), el 24 de abril de 1987. Los últimos siete meses los invirtió el Departamento de Defensa norteamericano en la revisión del mismo para que no dañara la seguridad nacional.

cuando menos, una década de investigación intensa. Además, la integración global del sistema y su efectividad dependen de modo decisivo de datos que, hasta donde sabemos, no se han obtenido todavía."

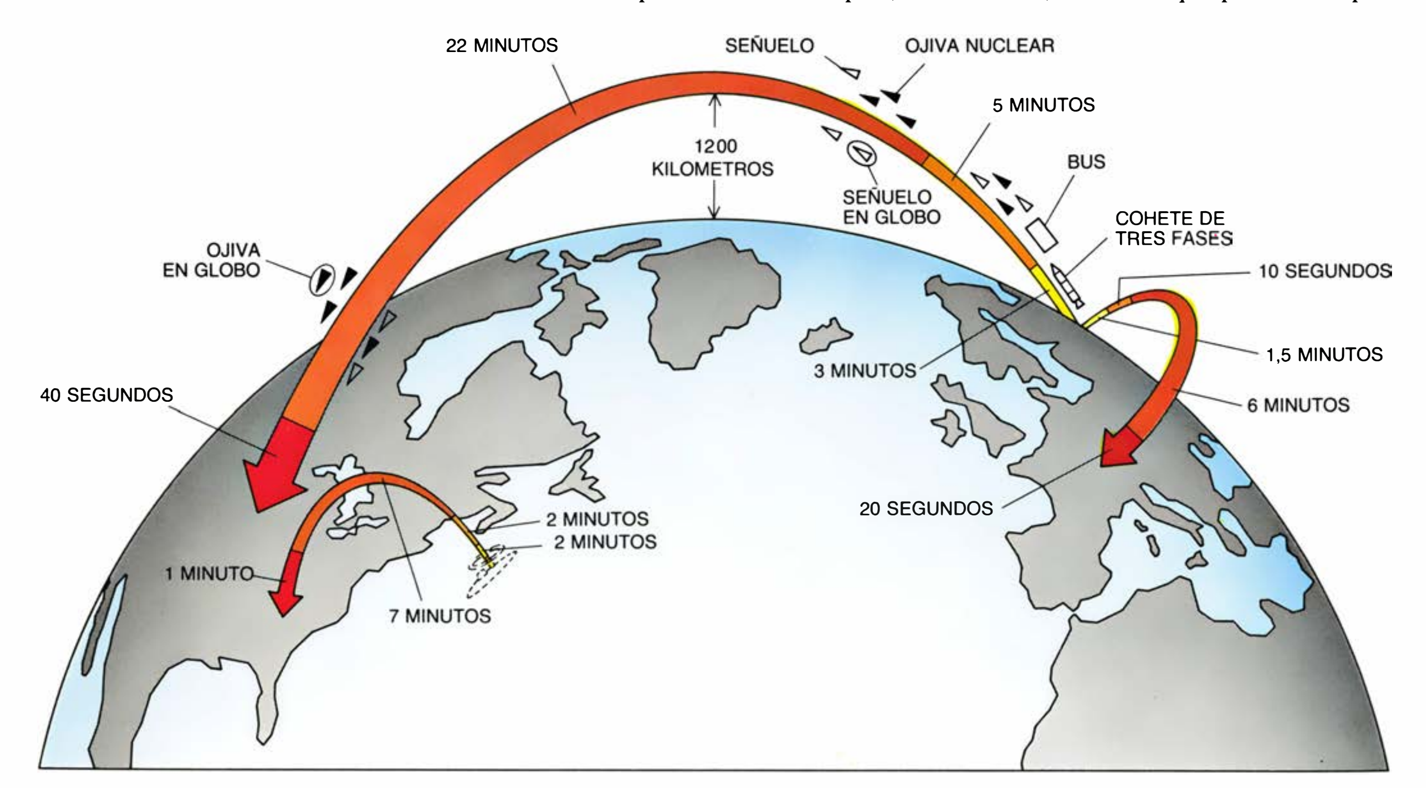
El estudio se centró en las armas de energía dirigida, porque esos ingenios se requerirán en casi todas las fases de la destrucción de un misil: la detección del lanzamiento, la localización y el seguimiento del blanco, la distinción entre ojivas nucleares y señuelos, la propia destrucción del objetivo y la verificación de la misma. El estudio no consideró explícitamente la otra clase principal de armas, las de agresión cinética: cañones químicos (cohetes) y cañones electromagnéticos. Los sistemas de defensa contra misiles balísticos que confíen a las armas cinéticas la destrucción de un blanco deberán también aprovechar las tecnologías de las armas de energía dirigida, para cumplir las misiones citadas antes. Por su naturaleza, todo sistema de defensa contra misiles balísticos depende en gran medida de la disponibilidad de una tecnología de armas de energía dirigida que haya alcanzado la suficiente madurez.

Nuestro análisis no se detiene en puntos tan significativos como son el mando, el control, las comunicaciones y los servicios de información (que reciben la denominación global de C^3I, por *command, control, communication and intelligence*), ni examina el soporte físico informático, la creación de programas, la seguridad del control de la batalla ni la complejidad de los sistemas en su conjunto. Otros apartados cuya importancia se reconoce pero que no se tuvieron en consideración fueron el potencial humano necesario, los costes y la relación coste/eficacia, el control armamentístico y la estabilidad estratégica, así como las implicaciones políticas internacionales y locales. Muchos de esos temas han sido objeto de enconados debates desde la fecha del anuncio presidencial del programa vulgarmente conocido por "Guerra de las galaxias"; sin embargo, sorprende que el único aspecto que no se haya analizado con suficiente objetividad y detalle sea precisamente el de la tecnología implicada.

La eficacia de cualquier defensa contra misiles balísticos depende de la exacta valoración que se haga de las cuatro fases del vuelo del misil: lanzamiento, postlanzamiento, fase intermedia y reentrada. La fase de lanzamiento empieza cuando el misil abandona la rampa y termina cuando la carga se separa del cohete propulsor. Suele durar unos tres minutos. Durante una fase de postlanzamiento típica, el "bus", o vehículo de postlanzamiento, dispara varios misiles más pequeños, los vehículos de reentrada (denominados también MIRV, por *multiple independent reentry vehicles*), y se encienden sus impulsores, que dirigen a cada uno hacia su blanco. A menudo se engloban ambas fases en una sola, pero las hemos mantenido separadas porque señalan distintas pautas a la defensa.

La fase más larga es la intermedia. Durante la misma, los vehículos de reentrada y los señuelos avanzan, juntos, en trayectorias sin apenas rozamiento muy por encima de la atmósfera. Suele durar unos 20 minutos en vuelos intercontinentales. Finalmente, los vehículos de reentrada penetran de nuevo en la atmósfera y en menos de 60 segundos alcanzan el suelo.

Las mejores ocasiones para desbaratar el ataque enemigo se presentan probablemente en las fases de lanzamiento y de postlanzamiento. Por varias razones, las armas de energía dirigida no desempeñan un papel especial en la fase final de reentrada. A la ventaja que supone el largo tiempo que se invierte en la fase intermedia se opone el incremento del número de objetos amenazadores (vehículos de reentrada y señuelos) respecto de las dos fases iniciales. En efecto, dado el número y la capacidad actual de las rampas soviéticas, se estima que podrían desple-

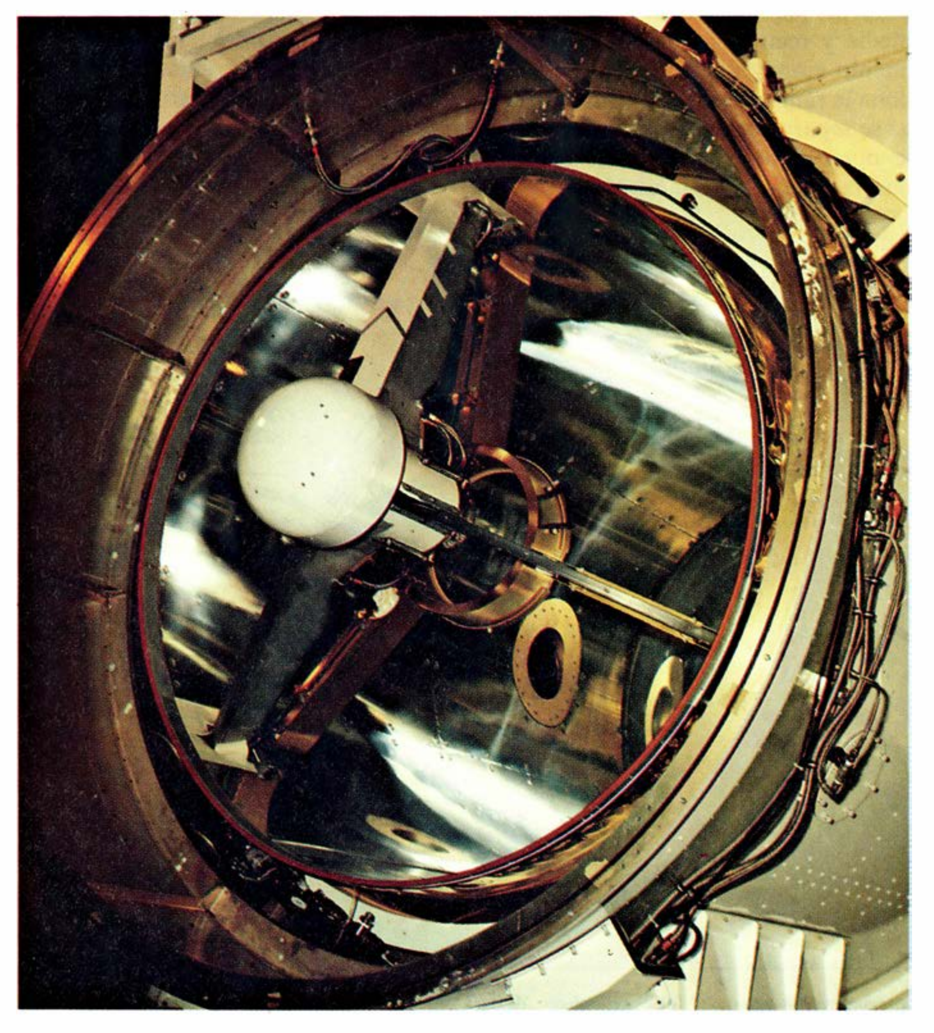


1. LAS CUATRO FASES del vuelo de un misil balístico intercontinental (ICBM), de un misil lanzado desde un submarino y de un misil de alcance intermedio. La primera fase, la de lanzamiento (*amarillo*), empieza cuando el misil abandona las rampas de lanzamiento y termina cuando la carga se separa del vehículo propulsor. Durante el postlanzamiento (*naranja claro*) un "bus", o vehículo de postlanzamiento, dispara pequeños misiles: vehículos de reentrada. En la fase intermedia (*naranja oscuro*) los vehículos de reentrada y los señuelos se mueven en trayectorias próximas. El vuelo termina con la fase de reentrada (*rojo*). Ante el gran número de blancos de la fase intermedia, las mejores ocasiones para frustar un ataque enemigo se dan durante el lanzamiento y postlanzamiento.

garse alrededor de medio millón o más de objetos amenazadores. Aun cuando una defensa contra la fase de lanzamiento alcanzara una eficacia del 80 por ciento, llegarían a la fase intermedia más de 100.000 objetos. El seguimiento de decenas o centenares de miles de objetos y su cabal discernimiento supondrían un formidable reto para los sensores y los ordenadores de control del combate.

Entre las armas para la fase de lanzamiento se están tomando en consideración cuatro tipos de láseres: los químicos, de excímeros, de electrones libres y de rayos X. Los haces que producen todos ellos viajan a la velocidad de la luz, lo cual significa que, a efectos operativos, se puede alcanzar cualquier blanco instantáneamente. Los láseres químicos, cuya tecnología es la que se encuentra más desarrollada, generan radiación por medio de reacciones químicas entre dos gases, como el hidrógeno y el flúor, o el deuterio ("hidrógeno pesado") y el flúor. Su producción es continua, y se han medido potencias de salida de esos láseres superiores a un megawatt (10^6 watt); un láser con un haz de 10 kilowatt puede cortar en pocos segundos una plancha de acero de medio centímetro de espesor.

En nuestra opinión, y pese a la impresionante potencia de los láseres químicos y a la gran calidad de sus haces, las más simples aplicaciones en defensa estratégica exigirían un incremento de los niveles de potencia actuales en un factor 20, como mínimo, y ello manteniendo el haz sin distorsión y reduciendo al mínimo su divergencia. Las distancias habituales entre el blanco y el láser obligarían a un aumento adicional de la potencia en un factor de cuatro. La arquitectura del láser químico que ha alcanzado el nivel de potencia del megawatt no se considera adaptable a la obtención de potencias mayores; deberá llegarse a éstas con diseños que aún no se han explorado. Por tanto, se ignora si el láser químico logrará ofrecer las potencias requeridas.



2. TRAZADOR LASER, diseñado para el seguimiento de objetos en vuelo y para apuntar en ellos un haz de luz láser. El instrumento de la fotografía forma parte del láser químico que emite en el infrarrojo intermedio (MIRACL). Los láseres químicos generan el haz por reacción entre gases, en este caso hidrógeno y flúor.

Por otra parte, la longitud de onda de la luz que emite el láser de hidrógeno-flúor (2,8 micrometros, o millonésimas de metro) la absorbe la atmósfera. Así, los láseres de esas características deberían situarse en el espacio, lo cual obligaría a considerar los problemas que plantearía las vibraciones y el desecho del combustible usado. Por el contrario, la atmósfera es virtualmente transparente a los haces de los láseres químicos de deuterio-flúor y de iodo atómico, que tienen longitudes de onda de 3,8 y 1,3 micrometros, respectivamente. De satisfacerse los requerimientos de potencia, esos láseres podrían instalarse en una base terrestre. Conviene, asimismo, recordar que los láseres de oxígeno deberían aumentar su capacidad actual al menos en cinco órdenes de magnitud (es decir, en un factor de 100.000).

Los láseres de excímeros constituyen el segundo tipo de esas emisiones cuya aplicación a las armas de energía dirigida es objeto de estudio. Los excímeros son dímeros excitados, es decir, compuestos inestables de dos moléculas. Una descarga eléctrica excita las moléculas hasta formar una molécula dimérica con enlace iónico. El dímero emite radiación y se disocia. Los láseres de ese tipo generan luz en forma de pulsos cortos. Entre los láseres de excímeros más potentes se cuenta el de kriptón-flúor que se está desarrollando en el Laboratorio Nacional estadounidense de Los Alamos. Emiten en una longitud de onda de 25 micrometros y ofrecen el inconveniente de su escasa transmisión atmosférica, comparada con la de la luz visible o la de algunos láseres que operan en el infrarrojo. En los láseres de excímeros de mayor interés, la pobreza de su transmisión no se debe a la absorción, sino a la difusión producida por moléculas atmosféricas. (Ese tipo de difusión, conocida como de Rayleigh, crece como la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la radiación.) La conmutación de la longitud de onda del láser en otras longitudes de onda mayores, por medio de la técnica de dispersión Raman, mengua la gravedad del problema.

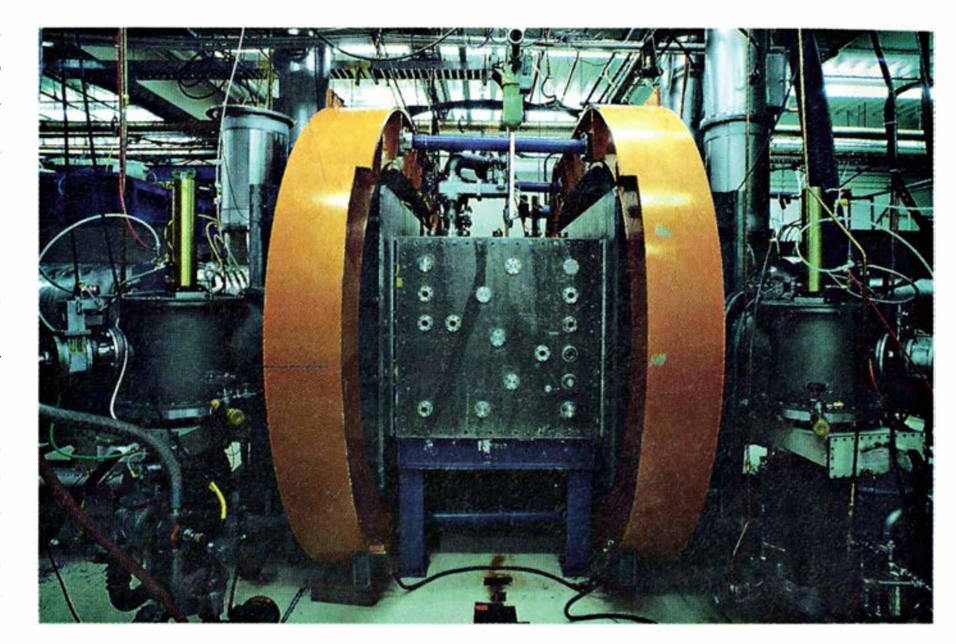
En nuestra opinión, los láseres de excímeros instalados en tierra y destinados a la defensa estratégica deben generar cuando menos 100 megajoule de energía por pulso, o por cada serie de pulsos de duración total comprendida entre uno y varios centenares de microsegundos. Los láseres de excímeros actuales generan unos 10 kilojoule de energía en pulsos que duran alrededor

de un microsegundo; por tanto, hay que aumentar la energía en un mínimo de cuatro órdenes de magnitud. Podría salvarse esa distancia combinando muchos láseres, pero queda por demostrar la viabilidad de tal sistema.

El tercer tipo de láser en fase de desarrollo que podría encontrar aplicación en la defensa contra misiles balísticos es el de electrones libres. Su modo de operación se basa en enviar un haz de electrones a través de una serie de imanes móviles; éstos provocan la vibración de los electrones y su consiguiente emisión de radiación. Variando la distancia entre los imanes o la energía de los electrones, la radiación puede, en teoría, sintonizarse en cualquier longitud de onda. En aplicaciones de defensa contra misiles balísticos, debería dotarse a los láseres de electrones libres con base terrestre de una potencia promedio mínima de un gigawatt (mil millones de watt) a una longitud de onda de un micrometro; esa radiación atravesaría la atmósfera con facilidad.

Se han conseguido potencias máximas de aproximadamente un megawatt a una longitud de onda de un micrometro; con radiación de ocho milímetros de longitud de onda (que absorbe la atmósfera) se han alcanzado potencias máximas de hasta un gigawatt. La consecución de potencias elevadas a cortas longitudes de onda constituye un arduo problema técnico. La hipotética construcción de láseres de electrones libres de gran potencia y óptimo rendimiento que operasen con radiación de un micrometro depende fundamentalmente de la corroboración experimental de varios conceptos físicos confinados todavía en el reino de la especulación teórica.

Quizás el más exótico de los láseres en período de desarrollo sea el de rayos X. Consta de un explosivo nuclear rodeado de un conjunto cilindriforme de fibras metálicas. Los rayos X emitidos durante la explosión nuclear estimulan la emisión de un haz de rayos X por parte de las fibras durante el breve intervalo de tiempo que precede a la autodestrucción del dispositivo. Se ha ensayado ya el ingenio en pruebas subterráneas, pero su hipotética utilidad militar sigue siendo incierta. La absorción de los rayos X en la atmósfera obliga a situar esos artefactos a más de 80 kilómetros de altura, quizás mediante algún ingenio de despliegue inmediato. Por otra parte, debe hallarse el modo de enfocar y guiar los haces de rayos X hacia sus blancos. Asimismo, antes de evaluar la aplicación militar de los láseres de rayos X generados por explosiones nucleares, habrá que confirmar muchas hipótesis físicas.



3. LASER DE EXCIMEROS que se está construyendo en el Laboratorio Nacional de Los Alamos; generará luz en forma de pulsos rápidos. El término excímero deriva de la expresión ‘‘dímero excitado’’, es decir, compuesto inestable formado por dos moléculas. Una descarga eléctrica excita la formación de una molécula dímera ligada iónicamente. El dímero emite radiación y se disocia. En este caso el excímero es de kriptón-flúor. Los imanes ovales aseguran que la descarga eléctrica (de un haz de electrones) se deposite homogéneamente en el gas de kriptón-flúor. El haz láser oscila hacia dentro y fuera del plano de la fotografía.

Concedamos el supuesto de que se logra construir láseres dotados de potencia suficiente para su aplicación en la defensa estratégica; permanecerían por resolver obstáculos formidables antes de que los haces abatieran los objetivos asignados. En primer lugar, todo haz de luz láser, cualquiera que sea su intensidad y su grado de colimación, se difracta, es decir, se extiende y pierde intensidad, en su viaje por el espacio. Para un láser de una potencia determinada, la intensidad del haz que llega al blanco es proporcional al cuadrado del diámetro del espejo con que se enfoca el haz, e inversamente proporcional al cuadrado del producto de la longitud de onda del láser y de la distancia al blanco. En consecuencia, para mantener la intensidad deseada en el blanco, cuanto mayor sea la longitud de onda o el alcance, mayor deberá ser el diámetro del espejo.

Los mayores espejos operativos en tareas de guía y enfoque tienen diámetros de unos ocho metros; sin embargo, las misiones de defensa estratégica exigirán el uso de espejos de diámetros comprendidos entre los 10 y 40 metros, tamaños eficaces que podrían alcanzarse mediante el empleo conjunto de varios espejos pequeños, en vez de uno solo y mayor. La acción de los espejos se coordinaría mediante dispositivos electrónicos. Hoy pueden controlarse varios centenares de esos dispositivos a la vez, pero se ignora si podrán someterse a control simultáneamente los 10.000 o 100.000 necesarios para las misiones de defensa. Además, la disposición de los espejos obliga a aplicar técnicas de corrección de fase, en virtud de las cuales se alinean con extremada precisión las ‘‘crestas’’ y los ‘‘valles’’ de las ondas del haz. Está por demostrar que esas técnicas puedan aplicarse en los intensos haces que necesita la defensa estratégica. Se encuentra en fase de desarrollo teórico una solución alternativa; consistiría ésta en utilizar membrana flexible y única, de gran tamaño.

Los espejos de cualquier sistema láser resultarían vulnerables a la radiación de otros láseres, en particular si los espejos forman parte de un sistema desplegado en el espacio. Láseres de potencia relativamente débil podrían causar daños de importancia en el revestimiento del espejo si sus longitudes de onda difirieran de la que, por diseño, está preparado para reflejar. También dañarían el revestimiento del espejo las partículas energéticas de los rayos cósmicos. Los espejos de tamaño pequeño deberían refrigerarse, para impedir que los deteriorara el propio haz del láser.

Los láseres instalados en tierra, como el de electrones libres o el de excímeros, aventajan a los alojados en el



4. LASER DE ELECTRONES LIBRES, el denominado PALLADIN. Emite en la banda infrarroja del espectro electromagnético. Se acelera un haz de electrones hasta energías de 50 millones de electronvolt (MeV); los electrones atraviesan entonces la serie de imanes que se muestra, que les hace vibrar y emitir radiación.

espacio en que el peso, la potencia y el abastecimiento no constituyen problemas de mayor importancia. Sin embargo, también los primeros dependerían de elementos ópticos instalados en plataformas espaciales; en efecto, para alcanzar desde bases terrestres estadounidenses los objetivos situados más allá de la línea del horizonte, debería reflejarse imprescindiblemente en ellos la radiación láser. Por otra parte, las turbulencias atmosféricas degradan la calidad del haz. En ese sentido se está analizando una técnica, denominada de conjugación de fase óptica, que habría de compensar los efectos de las turbulencias: se mide la distorsión que causa la atmósfera sobre un láser señalizador de poca potencia emitido desde la plataforma espacial donde se halla ubicado el espejo y se imprime esa información en el haz láser de gran potencia instalado en tierra, de tal forma que éste queda "predistorsionado" y emerge de la atmósfera con su calidad primigenia. Se ha comprobado la técnica con potencias pequeñas, pero ha de adaptarse aún a potencias mayores. Además, el número de dispositivos necesarios para deformar el espejo que genera la predistorsión del haz debe aumentarse en dos órdenes de magnitud.

Durante la actuación de un láser pulsante (como el de excímeros), el campo óptico asociado con el trayecto descendente desde el espejo hasta el objetivo sería muy intenso; tanto, que su intensidad bastaría para dispersar el haz láser (por efecto de la denominada dispersión Raman) en altitudes inferiores a los 80 kilómetros. El fenómeno cambia la longitud de onda de la radiación (lo cual no resulta de mayor importancia) y reduce la potencia disponible para el ataque contra el objetivo.

Finalmente, los sistemas láser de base terrestre deberían instalarse en distintos emplazamientos, separados centenares de kilómetros para evitar que las condiciones meteorológicas adversas, la cobertura nubosa, por ejemplo, inmovilicen las baterías de defensa. A su vez, en cada instalación habría que duplicar algunos de los grandes espejos telescópicos, separándolos varios kilómetros para evitar las coberturas nubosas locales.

La otra clase de armas de energía dirigida que interesa en la defensa contra misiles balísticos abarca a las que utilizan haces de partículas, con carga eléctrica o neutras. La mayoría de los haces de partículas están formados por electrones de gran energía. Estimamos que, en aplicaciones de intercepción, el voltaje del acelerador debería incrementarse al menos en un orden de magnitud, en dos la duración del pulso y al menos en tres órdenes de magnitud la potencia promedio. La capacidad de distinguir entre objetivos y señuelos requeriría un aumento de la duración del pulso de dos órdenes de magnitud, como mínimo, y de dos órdenes de magnitud de la potencia promedio.

La utilización de haces de partículas cargadas ha de hacer frente a una limitación: el campo magnético terrestre curva los haces. Además, tienden a "volatilizarse", es decir, a que las fuerzas de repulsión que actúan entre las partículas cargadas del mismo signo los inestabilicen. Se ha intentado compensar ambos efectos con la ayuda de haces láser. Se trataría de crear un canal de gas ionizado que sirviera de guía para los electrones de gran energía que forman el haz, igual que las fibras ópticas conducen los haces de luz. El mecanismo de guía ha funcionado en pruebas de laboratorio en distancias de 95 metros; en aplicaciones de defensa contra misiles balísticos debería cubrir 1000 kilómetros. El procedimiento no podría utilizarse en aquellas altitudes donde, si bien escasea mucho el gas a ionizar, resultan aún perceptibles los efectos del campo magnético terrestre. Por otra parte, a pequeñas altitudes, la gran densidad del gas provoca inestabilidades en el haz.

Se investiga también el desarrollo de haces de partículas neutras, a las que no afectan los campos magnéticos. Para generar un haz neutro se acelera otro de iones negativos (átomos que tienen un electrón en exceso) hasta que alcanza la energía requerida, se dirige, se le enfoca y se le quitan entonces los electrones de más. De acuerdo con nuestros cálculos, hay que incrementar, al menos en dos órdenes de magnitud, el potencial y el ritmo de emisión del haz de los actuales aceleradores de haces de partículas neutras. También deben mejorar notablemente la puntería y el ritmo con que puede reasig-

narse objetivos a los dispositivos. Los haces de partículas neutras presentan, además, otro inconveniente: interactúan intensamente con cualquier materia. A bajas altitudes, donde la densidad de gases es importante, la atmósfera arranca de las partículas neutras sus electrones más externos; el haz de partículas neutras se convertiría entonces en un haz de partículas cargado y adolecería de sus limitaciones. Los dispositivos de haces de partículas neutras deberían instalarse, pues, en el espacio.

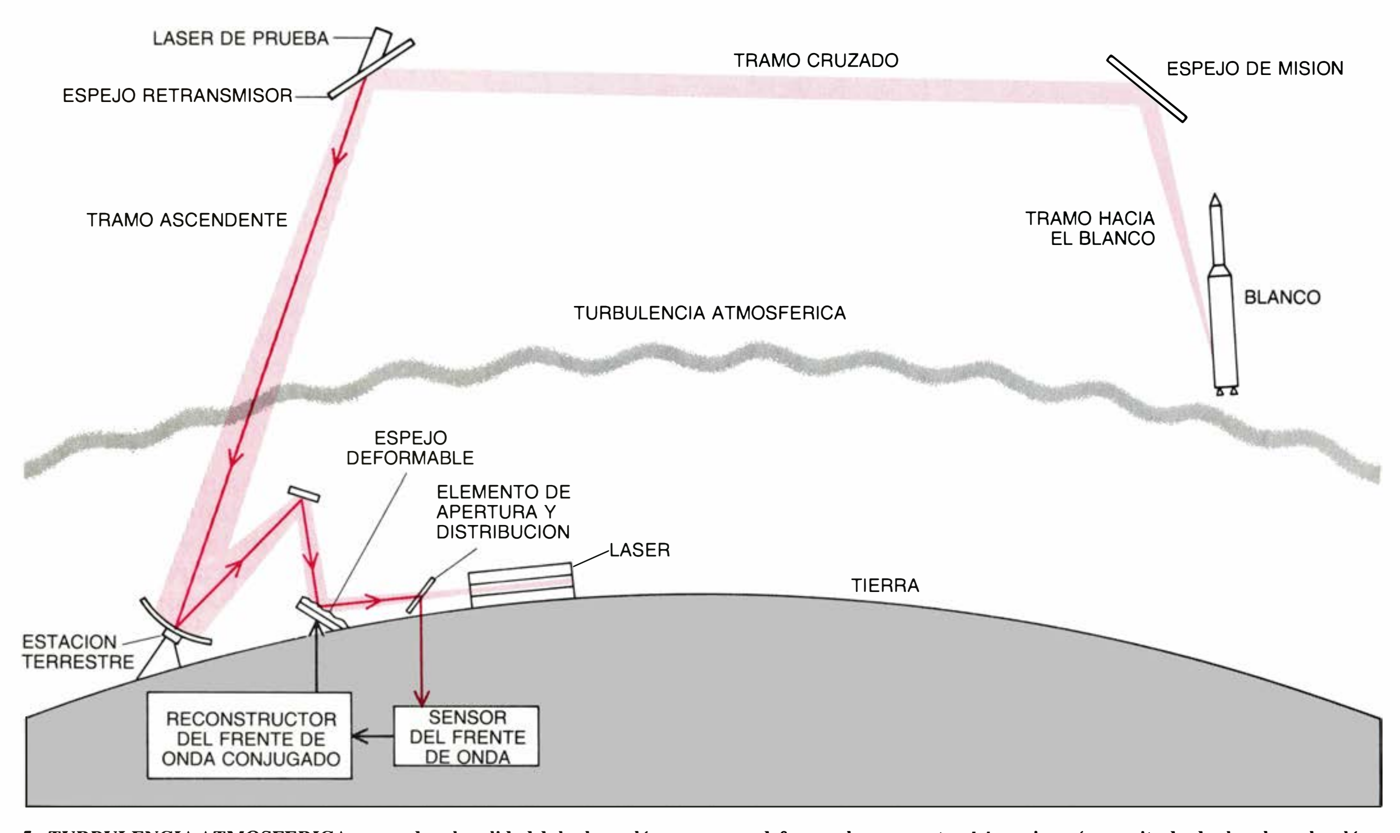
Dejemos de lado la forma en que los sistemas de defensa estratégica han de abatir los misiles. La eficacia de los mismos –entendiendo por tales los láseres, haces de partículas, cápsulas espaciales o armas electromagnéticas– no puede superar a su propia capacidad de detectar y seguir los objetivos asignados. Por ejemplo, para asegurar la destrucción del 90 por ciento de los misiles atacantes durante las fases de lanzamiento y postlanzamiento, han de detectarse bastante más del 90 por ciento de esos ingenios. Además, el seguimiento y destrucción de un blanco durante la fase intermedia dependen del conocimiento exacto de su trayectoria durante la fase de lanzamiento. Casi más importante aún resulta mantener baja la incidencia de falsas alarmas de la defensa contra misiles balísticos, para que no se active ésta en tiempo de paz.

Durante la fase de lanzamiento, el misil se localiza por la intensa radiación infrarroja que emite el penacho de gases que salen por las toberas de los propulsores del ingenio. La posición del misil dentro del penacho depende de la altitud, el tipo de misil y las características del propulsor y del combustible. Por tanto, la localización del misil puede variar por motivos imprevisibles para la defensa. El seguimiento infrarojo de los penachos de los misiles ha de completarse con otros medios que aseguren la precisión que requieren las armas de energía dirigida.

También plantea problemas el seguimiento durante las fases de postlanzamiento e intermedia. Las señales térmicas que se producen en la fase de postlanzamiento y por parte de los vehículos de reentrada son muy débiles: habrá que sumar, pues, a los detectores térmicos, radares de microondas u ópticos. Se precisaría entonces un gran número de plataformas espaciales dotadas de esos sensores, y también, quizá, de detectores que efectuaran el seguimiento durante la fase de lanzamiento.

En la fase intermedia, la defensa debe superar otro obstáculo: distinguir entre los vehículos de reentrada y los señuelos, que aparecerán en gran número para confundir o saturar los detectores defensivos. Las tecnologías de energía dirigida posibilitan la identificación de los señuelos. Los haces de partículas penetran profundamente en todo tipo de materiales; por ejemplo, un haz de hidrógeno neutro de entre 100 y 400 millones de electronvolt (MeV) de energía penetra hasta 40 centímetros en el aluminio. Por consiguiente, los haces de partículas dirigidos hacia los objetivos podrían muestrear su contenido y, aprovechando las emisiones del interior, determinar si se trata o no de una añagaza. Esa labor requeriría la participación de muchas plataformas espaciales capaces de operar en ambientes fuertemente contaminados de radiación nuclear. Las aplicaciones de discriminación se encuentran actualmente en fase de desarrollo teórico y en los primeros estadios experimentales.

Cualquier sistema de defensa estratégica que utilice armas de energía di-



5. TURBULENCIA ATMOSFERICA, que reduce la calidad de los haces láser, y cuya incidencia podría compensarse mediante dispositivos ópticos adaptables, en este caso un espejo deformable controlado por ordenador. La señal de un haz láser débil dirigida desde un espejo retransmisor hacia la base terrestre informa al sensor de frente de onda sobre la naturaleza y la magnitud de la turbulencia atmosférica. Un ordenador dirige entonces electrónicamente los dispositivos que deforman los segmentos del espejo; así, se emite desde el suelo un haz láser dotado de la "distorsión conjugada": al propagarse por la atmósfera, la distorsión se "contrarresta" y el haz llega al espejo retransmisor sin distorsión, es decir, en su calidad de origen. Aunque pueden controlarse ya varios centenares de esos dispositivos a la vez, se ignora si podrán dominarse simultáneamente los 10.000 o 100.000 dispositivos requeridos por las aplicaciones de defensa.

rigida consumirá importantes cantidades de energía. Para satisfacer sus funciones de mantenimiento —control de la altitud, refrigeración de los espejos, recepción y emisión de la información y funcionamiento de los radares— las plataformas espaciales deberán disponer de una potencia continua de entre 100 y 700 kilowatt. Al no existir proyectos concretos de esas estaciones, los requerimientos que hemos citado sólo pueden considerarse fiables en un factor dos. En cualquier caso, tal potencia sólo puede ofrecerla de un modo eficaz un reactor nuclear. Cada plataforma necesitaría su propio reactor, por lo que habría que desplegar en el espacio 100 o más reactores. Cubrir esos objetivos significa resolver muchos e importantes problemas de ingeniería que ni siquiera han empezado aún a explorarse; por ejemplo, la refrigeración de grandes reactores nucleares instalados en el espacio.

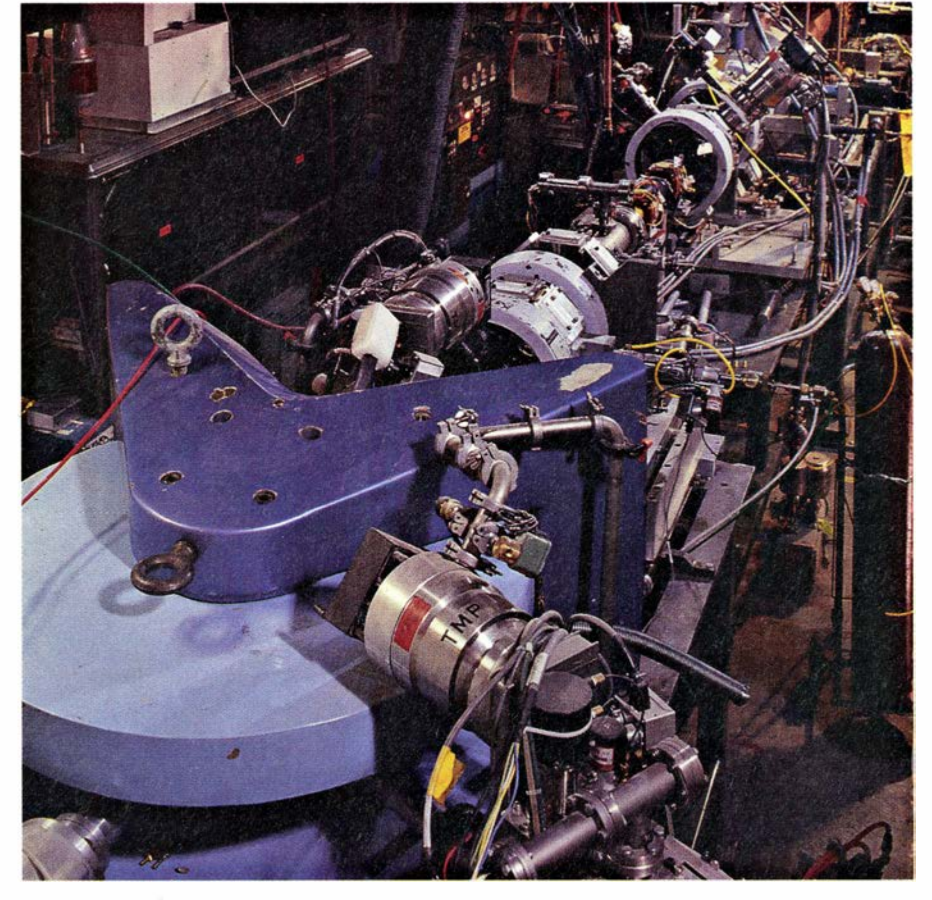
Las necesidades energéticas durante una intervención en combate real oscilarían entre los 100 megawatt y un gigawatt a lo largo de períodos de varios centenares de segundos, en función del tipo de arma espacial de energía dirigida. La energía se obtendría de grandes motores químicos o nucleares, desplegados a bastante distancia de las plataformas espaciales para evitar perturbaciones mecánicas. De utilizarse motores químicos, el consumo de combustible sería superior a las cinco toneladas por minuto de operación de la plataforma. Sin duda, el sistema de transmisión de energía desde los motores hacia la plataforma sería complejo. Los requerimientos energéticos inaplazables de las armas de energía dirigida instaladas en el espacio presentan, por tanto, inconvenientes técnicos importantes.

Otra cuestión clave en cualquier sistema de defensa contra misiles balísticos es la relativa a su supervivencia. Las plataformas espaciales transportarían instrumentos muy delicados: sensores, espejos ópticos y discos de radar, que se deterioran con mayor facilidad que los propulsores y que los vehículos de reentrada. Aunque puede protegerse los sensores y los espejos ópticos durante los largos períodos de inactividad, esos elementos quedarían expuestos a sufrir daño en cuanto se pusieran en alerta previendo un ataque inminente. El sistema defensivo resultaría vulnerable al asalto de armas espaciales o terrestres y armas cinéticas. Su ensamblaje en el espacio constituiría uno de los momentos de mayor vulnerabilidad. La pervivencia de un sistema que utilice elementos alojados en el espacio resulta, pues, altamente cuestionable.

También plantea serios interrogantes la supervivencia de los silos terrestres. Habría que proteger las instalaciones del ataque de múltiples amenazas, incluidos los misiles crucero y el sabotaje. El reducido número de bases terrestres proyectadas, que deberían ser capaces de llevar a cabo, cada una de ellas, todas las misiones asignadas a las armas de energía dirigida, las convertiría en un preciado objetivo.

La seguridad de un sistema de ese tipo queda también en entredicho ante la comprobación siguiente: por débil que sea un arma de energía dirigida para utilizarla en la defensa contra misiles balísticos, puede resultar poderosísima para amenazar a los componentes espaciales del sistema defensivo. Las plataformas espaciales se mueven en órbitas conocidas, o lo que es lo mismo, pueden seguirse durante períodos muy superiores a los que se dispone para el rastreo de los lanzadores, buses y vehículos de reentrada. Las plataformas probablemente estén formadas por componentes más vulnerables que las lanzaderas y que los vehículos de reentrada. Asimismo, las plataformas espaciales dispuestas en órbitas bajas podrían atacarse con sistemas de menor alcance que los requeridos para las intercepciones en la fase de postlanzamiento. En particular, los láseres de rayos X impulsados por explosiones nucleares constituirían una amenaza de especial magnitud para la delicada operación de los sensores espaciales, electrónicos y ópticos.

Han de considerarse también cuestiones del entorno estratégico y táctico. El desarrollo y despliegue de una defensa eficaz contra misiles balísticos es tarea que ocuparía muchos años. Por tanto, el atacante dispondría de mucho tiempo para desarrollar contramedidas. Cualquier sistema defensivo deberá diseñarse para afrontar gran variedad de respuestas, y resulta verosímil que se despliegue alguna imprevista. Es probable, por tanto, que un sistema de energía dirigida diseñado para las amenazas de hoy se demuestre inadecuado para superar a las que se le enfrenten cuando sea desplegado.



6. HAZ DE PARTICULAS NEUTRAS; se genera en Los Alamos acelerando primero un haz de iones con carga negativa. El electrón sobrante se arranca en una celda de gas, obteniéndose un haz neutro. La cámara azul que aparece en el extremo final del acelerador se utiliza para medir la velocidad de las partículas.

El grandioso desfile de las galaxias

La Vía Láctea se está moviendo a través del universo en concierto con un enjambre de otras galaxias. La fuente del impulso puede ser una remota concentración de masa, en una escala que desafía las teorías actuales

Alan Dressler

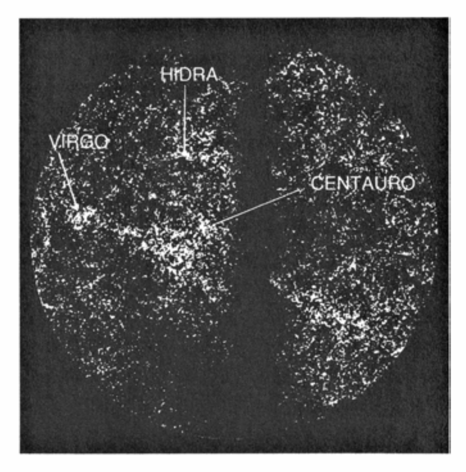
El origen y destino del universo están escritos en los movimientos de sus componentes. A principios del decenio de 1920, poco después del descubrimiento de que nuestra galaxia era una más entre miles de millones, se demostró que las galaxias distantes están alejándose en todas direcciones. Era evidente que el universo se halla en expansión y que las galaxias se están alejando entre sí, arrastradas por un entramado de espacio-tiempo en dilatación uniforme.

Más recientemente, ha quedado claro que las galaxias no están en reposo con respecto a esa trama en despliegue. Muestran movimientos propios, que permiten vislumbrar pistas acerca de la textura del cosmos: el alcance de sus fluctuaciones en densidad de masa. Cuanto sabemos ya de estos movimientos induce a suponer que la materia se amontona en escalas inimaginablemente grandes, que reflejan sucesos mal conocidos del universo primitivo. Los movimientos pueden responder también a una pregunta acerca del otro extremo del tiempo: ¿continuará la expansión del universo, o acabará por detenerse en virtud de las fuerzas gravitatorias, o incluso invertir su curso provocando su contracción hasta colapsarse en la densidad primigenia? Varios grupos de investigadores, entre ellos el del autor, están empeñados en la cartografía del aspecto y la escala de la corriente cósmica.

La importancia cosmológica de los movimientos galácticos quedó establecida a principios de este siglo, cuando los astrónomos norteamericanos Edwin P. Hubble y V. M. Slipher comenzaron a medir los corrimientos de las líneas espectrales en la luz procedente de otras galaxias. Tales corrimientos reflejan el efecto Doppler, es decir, la variación que sufren la longitud de onda de la luz o el sonido en virtud del movimiento de la fuente con respecto al observador. La mayoría de las galaxias mostraban un corrimiento hacia el rojo: las líneas estaban corridas hacia el extremo rojo, el de mayor longitud de onda, del espectro. Un corrimiento hacia el rojo indica movimiento que se aleja del observador.

Sesenta años más tarde, resulta difícil apreciar cuán radicales sonaban las sugerencias de un mutuo alejamiento de las otras galaxias, en todas direcciones, cuando se propusieron, a principios del decenio de 1920. Representaban un cambio en la visión del universo tan fundamental, en todos los aspectos, como lo fue la revolución de Copérnico: la noción de un universo estático se hallaba, por entonces, tan asentada como lo había estado la de un universo geocéntrico en el siglo XV. De hecho, el propio Hubble interpretó al principio sus datos como prueba de un universo inmóvil. Creyó que había confirmado un análisis teórico del matemático holandés Willem de Sitter, quien había hallado una solución estática de la ecuación de la relatividad general de Einstein. Al incluir un término que incorporaba un retardo del tiempo al aumentar la distancia, el análisis daba lugar a corrimientos hacia el rojo que crecían para galaxias más distantes, aun cuando no hubiera movimiento relativo.

Sin embargo, hacia finales del decenio de 1930, la idea de un universo en expansión había conquistado el favor general, incluido el del recalcitrante Hubble, y la medición de los corrimientos hacia el rojo de galaxias a distancias cada vez mayores estaba a la orden del día. Cuando los corrimientos hacia el rojo de las galaxias remotas se correlacionaron con sus distancias, estimadas a partir de sus brillos aparentes, se obtuvo la relación sencilla que cabía desear: la velocidad de recesión de una galaxia es igual a su distancia multiplicada por una constante. La implicación de esa relación lineal, conocida por ley de Hubble, era clara: la expansión del universo es uniforme. Un individuo instalado en una galaxia alejada miles de millones de años-luz vería la misma relación entre distancia y corrimiento hacia el rojo en las galaxias circundantes que vemos nosotros desde la Vía Láctea. Hacia el decenio de 1970, se aceptaba que la ley de Hubble encerraba una segunda implicación: la



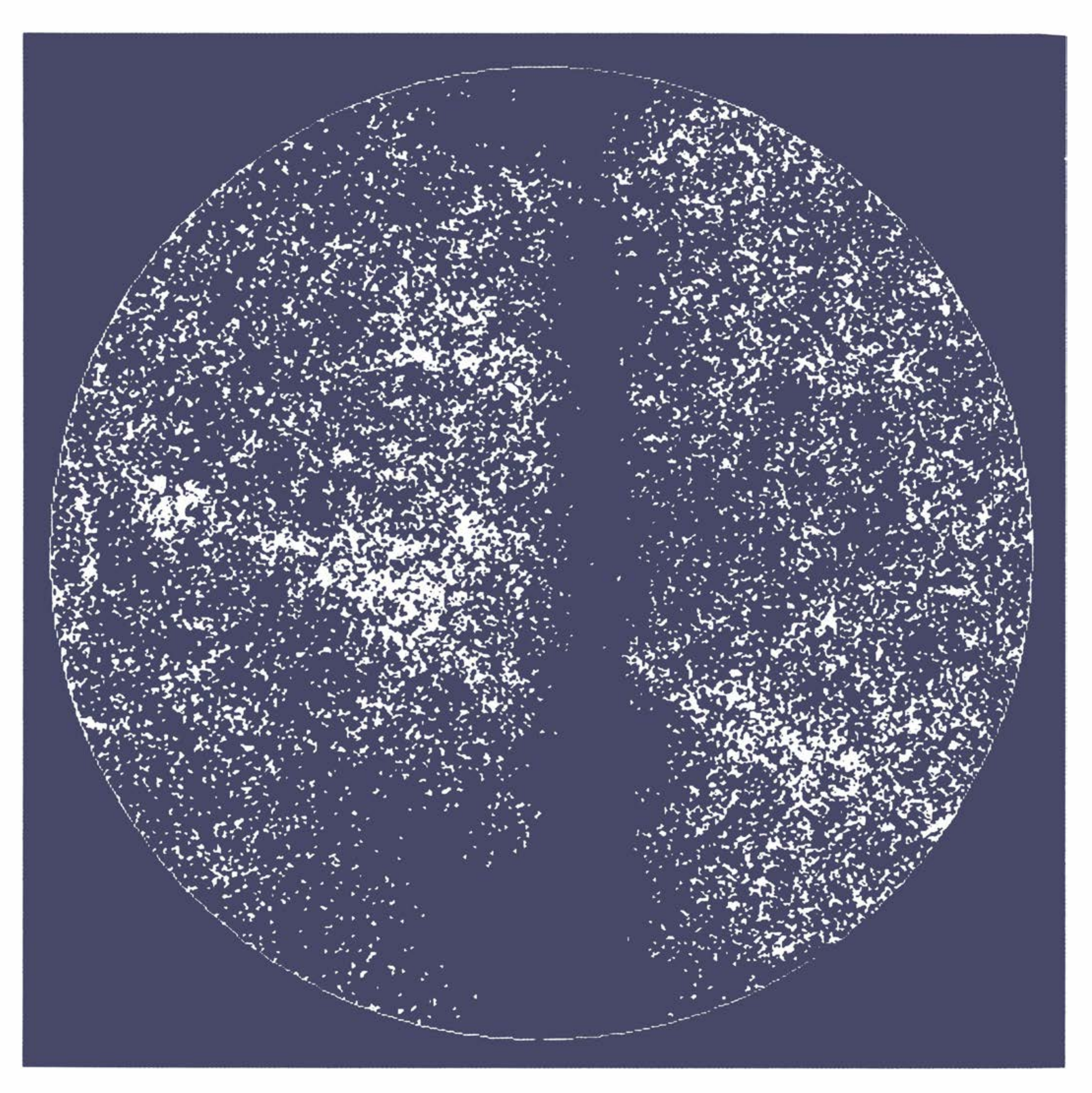
1. HEMISFERIO CELESTE y distribución de galaxias. La observación nos dice que está centrado en la dirección del movimiento galáctico en gran escala. Las agregaciones próximas de galaxias, tales como el cúmulo de Virgo y el supercúmulo de Hidra-Centauro (*arriba*) participan del movimiento, que se cree resultado de la atracción gravitatoria de una vasta y lejana concentración de masa, el Gran Atractor. Las galaxias que pueblan densamente el centro de la imagen pueden pertencer al Gran Atractor. Ofer Lahav, de la Universidad de Cambridge, construyó el mapa programando un ordenador para reunir tres catálogos de galaxias; la banda oscura del centro es la parte del firmamento ocultada por la Vía Láctea.

expansión observada del universo se desató, hace unos 15.000 millones de años, en un acontecimiento creador: la gran explosión.

A pesar de que fueron mejorando los datos acerca de los corrimientos hacia el rojo para galaxias remotas, la correlación entre distancia y corrimientos hacia el rojo siguió siendo, no obstante, decepcionantemente pobre para galaxias próximas. La mayoría de los investigadores creían que la baja correlación debíase a la gran dificultad en medir con precisión las distancias hasta otras galaxias. Había otra explicación posible y más profunda: que las propias galaxias tuvieran velocidades que se apartaran de la relación de Hubble. A medida que el entramado del espacio se expande uniformemente, dilatando la distancia mutua entre galaxias cual si de pasas de una tarta se tratara al hincharse el bizcocho, las propias galaxias podrían estar en movimiento: podrían tener movimientos "peculiares" con respecto al universo en expansión. Tales movimientos se harían más evidentes en las galaxias cercanas, cuyas velocidades de Hubble son bastante bajas; además, al reflejar quizá los efectos gravitatorios de una distribución desigual de la materia, podrían adquirir una considerable significación cosmológica. Pero la cuestión quedó en vía muerta durante algunos decenios.

Los investigadores se ocuparon de otro enfoque de los problemas cosmológicos. Estudiando galaxias a distancias cada vez mayores, los observadores esperaban medir corrimientos hacia el rojo cada vez más remotos. El corrimiento hacia el rojo de una galaxia alejada no delata, de hecho, su velocidad actual, sino su velocidad millones o miles de millones de años atrás, cuando la luz salió de la galaxia. Comparando esas antiguas velocidades de expansión con las deducidas de galaxias más cercanas, se podría inferir si el universo continuará su expansión, ésta se detendrá o aquél acabará por contraerse de nuevo.

Durante cuarenta años, los investi-

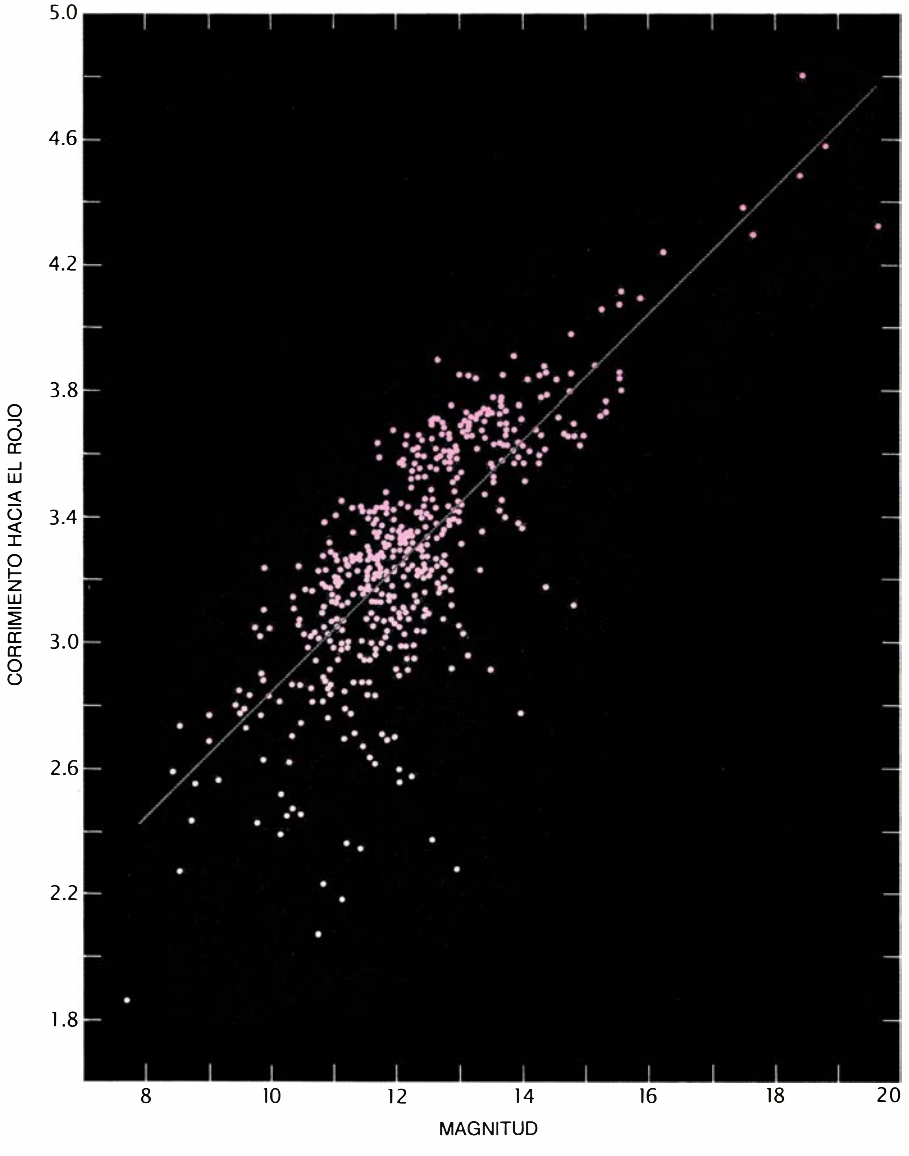


gadores trabajaron en busca de respuesta ante tan profunda cuestión cosmológica, basándose en mediciones de corrimientos hacia el rojo de galaxias distantes, hasta que quedó claro que la hipótesis fundamental de la estrategia era injustificada. El corrimiento hacia el rojo solía medirse para la galaxia más luminosa en cada cúmulo observado; se suponía que estas galaxias más brillantes poseían el mismo brillo intrínseco, cualquiera que fuera su distancia. Afianzados en tal hipótesis, podría juzgarse su distancia a partir de su brillo aparente. En el decenio de 1970, sin embargo, los investigadores se dieron cuenta de que tales galaxias podían cambiar de brillo con el tiempo, a medida que evoluciona su población de estrellas. A grandes separaciones de espacio y tiempo, no pueden servir como patrones fidedignos de brillo.

El fracaso de los esfuerzos empeñados en pronosticar la evolución del universo midiendo corrimientos hacia el rojo a distancias de miles de millones de años-luz condujo a los investigadores a fijarse de nuevo en los movimientos de las galaxias "próximas", es decir, las que están a menos de 100 millones de años-luz. Los estudios de las galaxias vecinas pueden responder a las mismas preguntas cosmológicas que las mediciones de antiguas velocidades de expansión. Así por ejemplo, si los objetos astronómicamente próximos se van acercando a través del espacio en virtud de la atracción gravitatoria de una concentración de galaxias, sus velocidades revelarán la masa atrayente. Correlacionando la masa con el exceso observado de galaxias, determinaremos la cantidad de masa asociada con una galaxia media y, de esa masa, calcularemos la densidad local del universo. Suponiendo que el volumen considerado sea representativo del universo en su conjunto, el resultado nos indicará si la atracción de la gravedad será suficiente para detener la expansión cosmológica.

Cuando comenzó en serio el estudio de los movimientos peculiares, en el decenio de 1970, admitíase que las velocidades peculiares debían ser pequeñas en relación con el campo de expansión de Hubble. En ese sentido, Allan R. Sandage, del Observatorio del Monte Wilson, argumentaba coherentemente que si los movimientos peculiares de algunos cientos de kilómetros por segundo en direcciones desordenadas fueran habituales, muchas galaxias próximas mostrarían corrimientos hacia el azul: las líneas de sus espectros se correrían por efecto Doppler hacia el extremo azul del espectro, indicando un movimiento en dirección hacia la Tierra. Sus velocidades peculiares en nuestra dirección compensarían ampliamente la expansión de Hubble. El hecho de que casi todas las galaxias muestren corrimientos hacia el rojo permitía a Sandage inferir que el movimiento de Hubble es muy lento y que las galaxias, consideradas individualmente, discrepan del mismo en menos de 100 kilómetros por segundo.

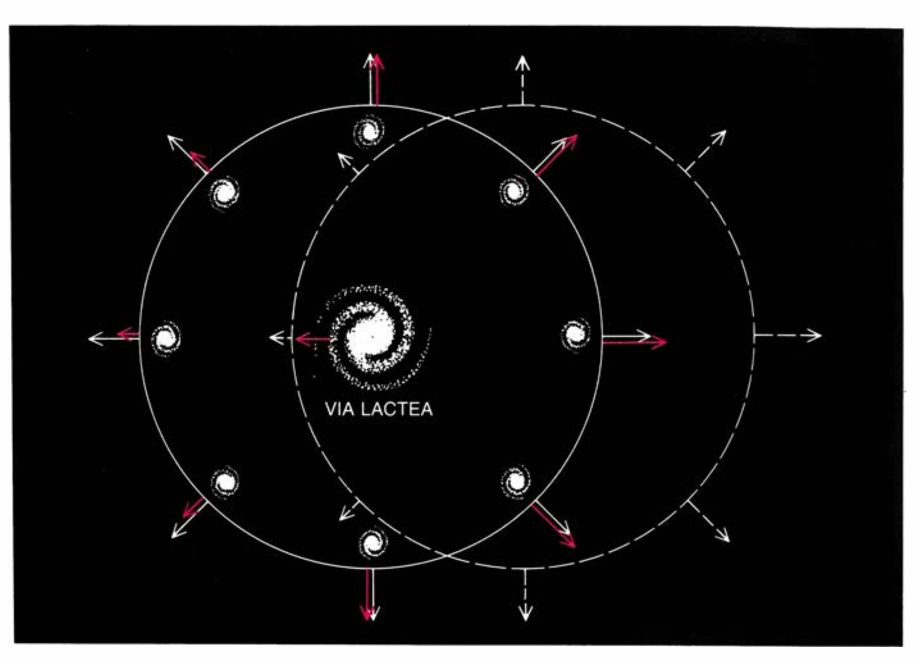
De aquí que se recibiera con una buena dosis de escepticismo el informe de Vera C. Rubin y W. Kent Ford, Jr., del Instituto Carnegie de Washington, cuando sostuvieron, en 1975, que nuestra propia galaxia poseía una velocidad peculiar substancial: alrededor de 500 kilómetros por segundo, medida con respecto a galaxias distantes tomadas como punto de referencia. Rubin y Ford llegaron a su resultado comparando los corrimientos hacia el rojo de las galaxias de una muestra distribuida por todo el cielo. Tal era su razonamiento: siempre que las galaxias de referencia se hallen a la misma distancia de la Tierra, más o menos, la diferencia sistemática en sus corrimientos hacia el rojo



2. DIAGRAMA DE HUBBLE: indica que las galaxias están alejándose de la Tierra a velocidades proporcionales a sus distancias, dando testimonio de la expansión uniforme del espacio. El eje vertical pone de manifiesto el corrimiento hacia el rojo de galaxias de muestra, es decir, el corrimiento Doppler de las líneas de sus espectros, como resultado del movimiento de alejamiento de la Tierra. La magnitud de las galaxias se representa a lo largo del eje horizontal. Cada unidad de magnitud creciente representa una disminución logarítmica del brillo; la magnitud da una indicación muy burda de la distancia. Este diagrama de Hubble, publicado en el año 1956 por Milton L. Humason, Nicholas U. Mayall y Allan R. Sandage, ofrece algo que dejó entonces perplejos a los investigadores: las galaxias de baja magnitud (las próximas) presentaban corrimientos hacia el rojo que se desviaban de la relación lineal. Parece ahora que el movimiento "peculiar" de las galaxias a través del universo en expansión podría explicar algunas de las discrepancias.

reflejaría el movimiento de nuestra propia galaxia. Pero se trataba de una tarea difícil: si las galaxias de referencia a un lado del cielo estuvieran, en promedio, más lejos que las galaxias del otro lado, la diferencia entre los corrimientos hacia el rojo se limitaría a reflejar la corriente de Hubble y no el movimiento característico de la Vía Láctea.

De entre las más brillantes galaxias espirales, Rubin y Ford eligieron una clase de galaxias cuyo brillo intrínseco se creía más o menos constante. Al escoger galaxias del mismo brillo aparente, confiaban en obtener puntos de referencia a la misma distancia media de varios cientos de millones de años-luz en todas las direcciones. Sin embargo, en vez de aceptar la sorprendente conclusión que Rubin y Ford sacaron de las diferencias de corrimiento hacia el rojo observadas, muchos investigadores prefirieron creer que esos astrónomos habían fracasado en su intento de construir un marco de referencia equidistante, tal vez porque las galaxias guardan una distribución desigual dentro del dominio de distancias definido por el criterio del brillo.



3. METODO DE OBSERVACION seguido por Vera C. Rubin y W. Kent Ford Jr., de Washington, que les condujo a postular que la Vía Láctea se hallaba en movimiento a través del espacio. Escogieron una muestra de galaxias que rodeaba la Vía Láctea a una distancia que se procuraba fuese constante. Según el diagrama de Hubble, la velocidad de recesión de la muestra de galaxias debería ser entonces la misma en todas las direcciones (*flechas blancas*). En realidad, las galaxias de un lado del cielo parecían moverse a mayor velocidad que las galaxias del otro lado (*flechas rojas*), lo que sugiere que nuestra propia galaxia está en movimiento. El descubrimiento era ambiguo: si las galaxias de la muestra estuvieran más cerca de la Vía Láctea en una dirección (*circunferencia a trazos*), la diferencia observada en las velocidades de recesión podría explicarse enteramente con la relación de Hubble entre el corrimiento hacia el rojo de una galaxia y su distancia.

Es obvio que, para hallar el movimiento peculiar de nuestra galaxia, se necesita un marco aceptable de referencia. En 1977, los investigadores vieron que la radiación cósmica de fondo –el débil residuo de la gran explosión– podía proporcionar tal marco. La radiación de fondo se emitió unos 10 millones de años después de la creación, cuando el plasma que llenaba el primitivo universo se enfrió para formar átomos de hidrógeno, y el universo se hizo transparente a la radiación. Originariamente emitida en las longitudes de onda del visible e infrarrojo por gas a temperaturas de miles de grados, la radiación se corrió radicalmente hacia el rojo durante la rápida expansión del universo primitivo, de modo que hoy llega a la Tierra con baja energía, en forma de microondas. Su frecuencia concuerda con la de la radiación emitida por un objeto a una temperatura de 2,7 grados por encima del cero absoluto.

Una propiedad notable del fondo de microondas es la relativa a su uniformidad: su temperatura es virtualmente constante en la totalidad del cielo. Sin embargo, en 1977, los instrumentos instalados a bordo de un globo registraron una pequeña y suave variación sinusoidal de esa temperatura. En una dirección dada, la radiación era unas milésimas de grado más "caliente" que el promedio; en la dirección opuesta, estaba por debajo en la misma cuantía. Se propuso una explicación sencilla: la radiación estaba corrida hacia el azul en una dirección y hacia el rojo en la otra debido al movimiento peculiar de nuestra galaxia.

La distribución sugería en concreto que el sistema solar se movía a casi 400 kilómetros por segundo con respecto a la radiación de fondo de microondas. Además, el sistema solar está en órbita alrededor del centro de la Vía Láctea, que a su vez deriva hacia la galaxia de Andrómeda, su vecina más próxima. Tras las correcciones por esos movimientos, el resultado de las microondas implica que el Grupo Local de galaxias (la Vía Láctea, Andrómeda y varias galaxias vecinas) viaja por el espacio a 600 kilómetros por segundo. Se mueve en una dirección perpendicular a la visual que une nuestro sistema solar con el centro de la galaxia, opuesta a la dirección de la rotación galáctica y a unos 27 grados por encima del plano galáctico. La medición se confirmó pronto, y la noción de una corriente tranquila de Hubble se relegó al olvido. Por primera vez desde que la teoría de la relatividad de Einstein socavó el concepto de sistema absoluto de referencia, parecía que se había medido un "movimiento absoluto": el movimiento del Grupo Local con respecto al universo en su conjunto.

El resultado de las microondas corroboró la aseveración de Rubin y Ford según la cual nuestra galaxia se halla en movimiento. Había discrepancias, sin embargo, en los detalles de los descubrimientos: los dos vectores velocidad apuntaban en direcciones casi opuestas. Como la comprobación del fondo de microondas era innegable, el trabajo de Rubin y Ford quedó etiquetado entre los "resultados por explicar". Los investigadores se dedicaron a un nuevo problema: ¿cuál podría ser la causa del considerable movimiento peculiar del Grupo Local?

Entraba dentro de lo posible que el movimiento constituyera una reliquia de los procesos explosivos que ocurrieron durante la antigua época de formación de las galaxias. Pero las velocidades peculiares generadas hace miles de millones de años habrían acabado por perderse a lo largo de la expansión general del universo. Era más probable que el impulso responsable del movimiento absoluto de nuestra galaxia continuara activo, como el fenómeno de la atracción gravitatoria de una concentración de masa. Ahora bien, la mayor parte de la materia vi-

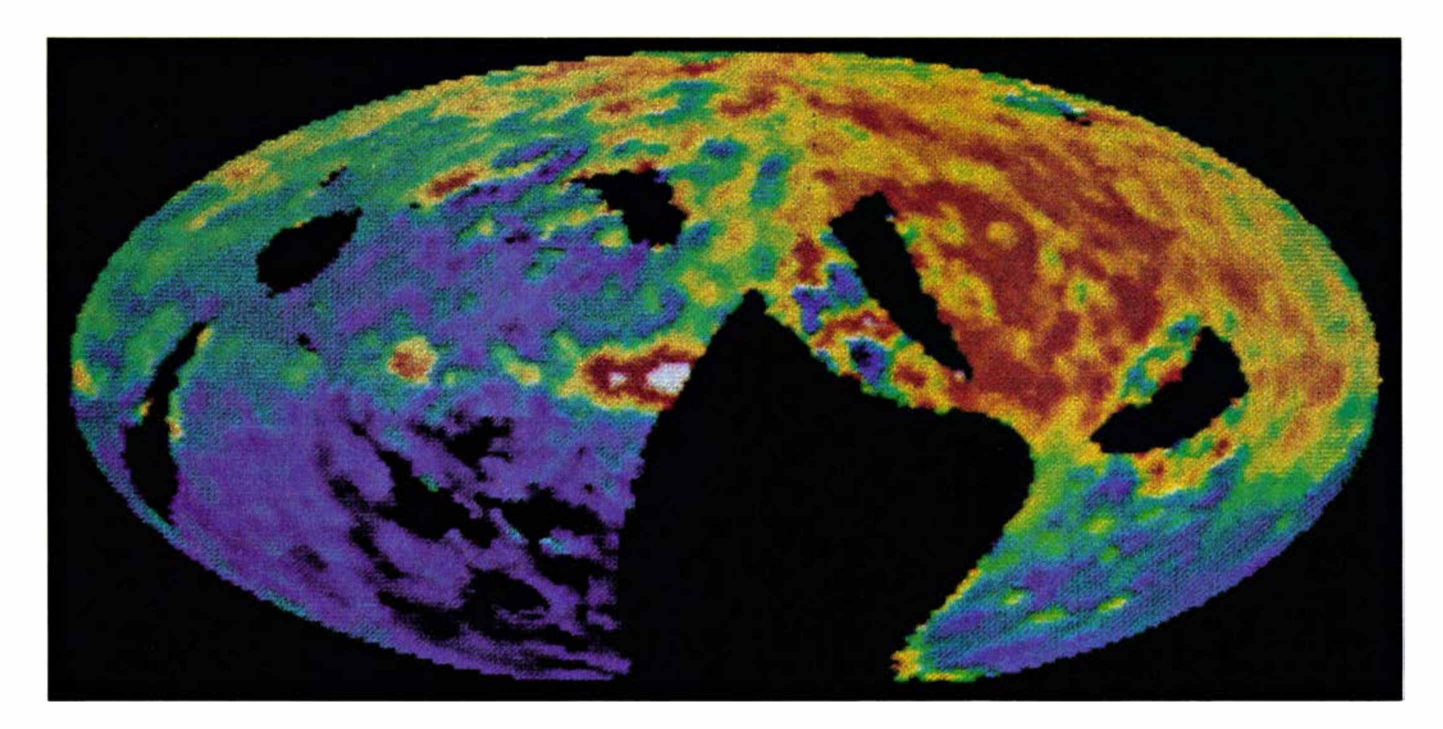
sible del universo está incluida en las galaxias; por tanto, una región del espacio que contenga un exceso de ellas es la fuente de atracción más verosímil.

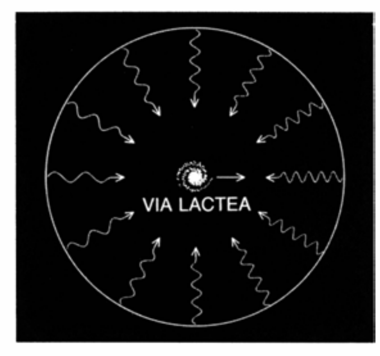
¿Cuántas nuevas galaxias se necesitarían para acelerar el Grupo Local hasta una velocidad de 600 kilómetros por segundo? Las leyes de la gravitación de Newton indican que la cantidad de masa que se precisa para producir una aceleración dada aumenta con el cuadrado de la distancia. Muchos investigadores se muestran reacios a admitir variaciones, a gran escala, de la densidad del universo y se inclinan por aceptar que la concentración ha de estar próxima. A una distancia de unos 30 millones de años-luz (la distancia del cúmulo de galaxias más próximo), la atracción gravitatoria de varios cientos de galaxias de más, actuando a lo largo de la vida del universo, podría generar la velocidad observada. A 300 millones de años-luz, harían falta decenas de miles de galaxias.

Varios grupos se hallan afanados en la búsqueda de ese Gran Atractor: el exceso de densidad de galaxias que mantiene al Grupo Local bajo su dominio. No basta con construir mapas del cielo, que pueden revelar los cúmulos de galaxias y los supercúmulos –agrupaciones de varios cúmulos–, pero no la masa que contienen ni la magnitud de sus efectos gravitatorios. El problema es bastante más difícil que el de medir sólo el movimiento peculiar del Grupo Local; para hallar el Gran Atractor deben medirse los movimientos peculiares de muchas *otras* galaxias. Suponiendo que la muestra se extienda a un volumen de espacio de tamaño suficiente para incluir el propio exceso de densidad, la distribución de los movimientos delataría la posición de las masas atractoras.

En la práctica se miden las velocidades de las galaxias que se encuentran a distancias conocidas, dentro de un gran volumen de espacio. Tras considerar el propio movimiento del Grupo Local, de 600 kilómetros por segundo, y substraer la fracción de la velocidad de recesión de cada galaxia debida a la expansión de Hubble, lo que queda es la velocidad peculiar de la galaxia, generalmente subestimada porque el corrimiento hacia el rojo se limita a revelar la componente del movimiento de aproximación a la Tierra o de alejamiento de la misma. Si las velocidades peculiares de las galaxias dentro de una esfera centrada en el Grupo Local son semejantes, en dirección y módulo, al propio movimiento del Grupo Local, es razonable inferir que el Gran Atractor queda fuera de la esfera y actúa sobre todas las galaxias de la región. La tarea es, pues, agrandar la esfera hasta que las galaxias más externas estén en reposo con respecto a la expansión hubbleana global del universo.

La esfera resultante incluye el exceso de densidad responsable del movimiento peculiar del Grupo Local y otras galaxias próximas. En la dirección del exceso de densidad, las velocidades peculiares aumentarán, como si las galaxias estuvieran cayendo hacia la masa atractora. (De hecho, la distancia entre la masa atractora y las galaxias en movimiento hacia ella puede seguir aumentando, debido a la corriente de Hubble; el atractor sólo retarda esta





4. TEMPERATURA DE LA RADIACION DE FONDO DE MICROONDAS: constituyó la prueba concluyente de que nuestra galaxia posee un movimiento absoluto. La radiación de fondo es una débil reliquia de la radiación que surcó, en todas direcciones, el gas del primitivo universo, un gas ardiente de densidad uniforme. Un panorama, extendido a 360 grados, de la radiación de microondas del cielo (*arriba*), con su ecuador alineado con el plano de la galaxia, muestra que esta señal uniforme es más "caliente" (en unas milésimas de grado) en una dirección (*blanco*) que la opuesta (*azul oscuro*). Se cree que la variación es un efecto Doppler debido al movimiento de nuestra galaxia con respecto al universo en conjunto (*izquierda*). El mapa fue realizado por Dale Fixsen, Edward S. Cheng y David T. Wilkinson, de Princeton, a partir de datos obtenidos a bordo de un globo; el hueco en la parte inferior refleja la falta de datos del Hemisferio Sur.

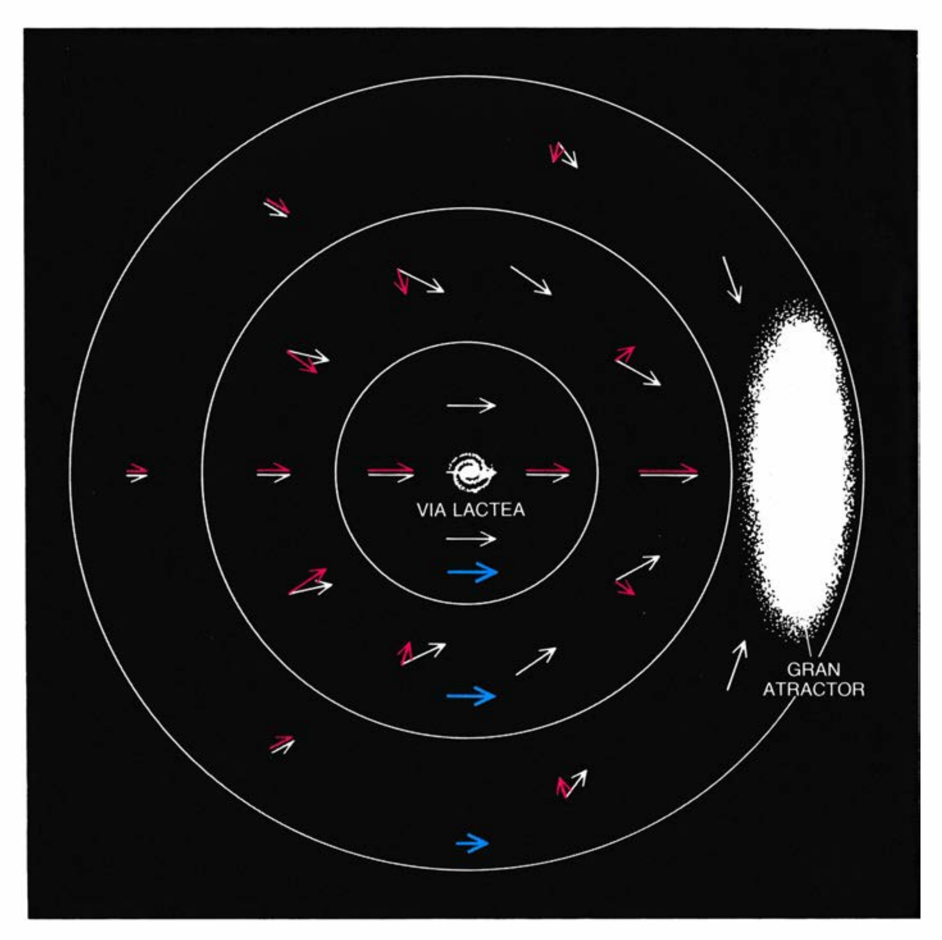
corriente.) Las galaxias que forman parte de la propia masa atractora estarán más o menos en reposo con respecto al fondo de microondas.

Para cartografiar los movimientos peculiares de otras galaxias, necesitamos dos tipos de información: el corrimiento hacia el rojo, que indica la velocidad de alejamiento de una galaxia con respecto a la Tierra, y la distancia a partir de la cual se puede determinar qué proporción del corrimiento hacia el rojo corresponde a la expansión del espacio. De aquí que la estrategia requiera un buen método para estimar la distancia, porque la velocidad peculiar de una galaxia puede constituir sólo una pequeña fracción de su velocidad observada.

En vez de considerar clases particulares de galaxias como patrones de brillo, dotadas, por hipótesis, de un brillo intrínseco constante, los investigadores han buscado un método más empírico y comprobable para estimar las distancias. El artificio consiste en hallar un parámetro mensurable que esté relacionado con el brillo intrínseco de una galaxia de manera conocida y que no se vea afectado por la distancia. La primera de tales variables que se aplicó a la tarea de medir velocidades peculiares fue la velocidad de rotación de las galaxias espirales. La correlación entre la velocidad de rotación y el brillo de la galaxia se conoce como relación de Tully-Fisher.

Dicha relación se deduce de forma natural de la mecánica newtoniana. La velocidad de rotación de una galaxia espiral es una medida de las velocidades orbitales de las estrellas del disco galáctico. La velocidad orbital debe depender sólo de la masa de la galaxia, suponiendo que todas las espirales tengan parecida densidad de masa. Si se supone también que tales galaxias producen la misma cantidad de luz para una cantidad dada de masa, la velocidad de rotación puede servir de indicación del brillo intrínseco.

El método y sus hipótesis inherentes se pueden comprobar comparando la velocidad de rotación con el brillo en una muestra grande de galaxias de un cúmulo único; como tales galaxias se encuentran aproximadamente a la misma distancia de la nuestra, sus brillos aparentes serán proporcionales a sus brillos intrínsecos. La velocidad de rotación, como la velocidad de recesión, puede deducirse a partir del espectro de la galaxia. La diferencia en el corrimiento Doppler de las ondas luminosas o de radio procedentes de lados opuestos de una galaxia en rotación causa un ensanchamiento de las líneas espectrales. Después de hacer una corrección en razón del ángulo entre la galaxia en rotación y la línea visual, el grado de ensanchamiento indica la velocidad de rotación. Marc Aaronson, de la Universidad de Arizona, Jeremy Mould, del Instituto de Tecnología de California, John P. Huchra, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y sus colaboradores, han visto que las velocidades de rotación y los brillos de las galaxias del cúmulo de la Cabellera de Berenice y de varios otros cúmulos difieren de una correlación estricta en no más de un 20 por ciento.



5. ESTRATEGIA PARA HALLAR EL GRAN ATRACTOR: la concentración de masa responsable de los movimientos peculiares de la Vía Láctea y de muchas otras galaxias. Dicha estrategia se expone aquí de manera esquemática. Los movimientos absolutos de galaxias (*flechas blancas*) en volúmenes de espacio cada vez mayores se deducen a partir de la componente del movimiento que puede medirse directamente del corrimiento hacia el rojo de la galaxia: el movimiento peculiar de acercamiento hacia la Tierra o de alejamiento de la misma (*flechas rojas*). Si todas las galaxias de una región esférica muestran velocidades peculiares similares, el Gran Atractor cae presumiblemente más allá de las galaxias observadas y está ejerciendo su atracción sobre todas ellas. Extendiendo las observaciones hasta que la velocidad peculiar media (*flechas azules*) de las galaxias más distantes se aproxima a cero, se obtiene una esfera que incorpora al Gran Atractor.

La distancia a cualquier otra galaxia espiral puede estimarse usando de referencia las muestras de cúmulos. Después de medir la velocidad de rotación de una galaxia, se acude a la relación de Tully-Fisher para el cúmulo de la Cabellera, a fin de hallar el brillo de una galaxia de referencia que tenga la misma velocidad de rotación. La comparación del brillo de la galaxia observada con el de la galaxia de referencia da la distancia de la galaxia observada en términos del cúmulo. No se ha medido, por supuesto, la distancia al propio cúmulo de la Cabellera, sino tan sólo su velocidad de Hubble, de 7200 kilómetros por segundo. Se ha convenido, pues, en expresar la distancia de la galaxia observada en términos de su velocidad de Hubble esperada. El movimiento peculiar es sencillo de calcular, restando la velocidad esperada de la galaxia de su velocidad real.

Hay varios factores que complican el problema. La relación de Tully-Fisher tiene una incertidumbre intrínseca de un 20 por ciento para cada galaxia observada. Además, el propio cúmulo de referencia puede, por sí mismo, tener un movimiento peculiar: puede ser que no toda la velocidad del cúmulo de la

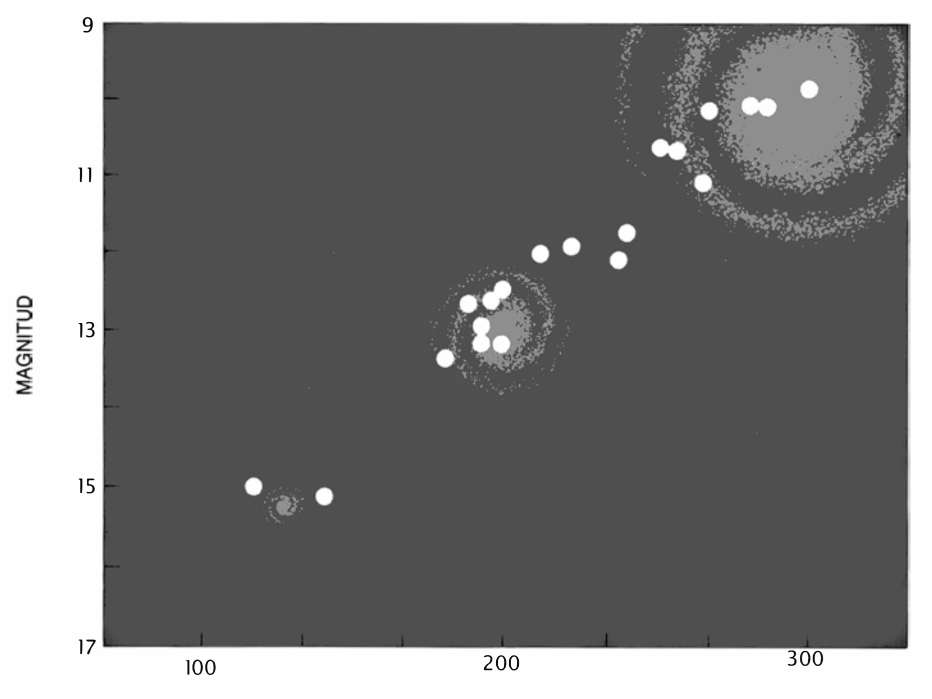
Cabellera, de 7200 kilómetros por segundo, sea debida al movimiento de Hubble. Para compensar esas fuentes de error, deben estudiarse muchas galaxias sobre una gran zona del cielo y emplearse varios cúmulos de referencia antes de obtener resultados estadísticamente significativos.

En 1982, Aaronson, Huchra, Mould, Paul L. Schecter, de los observatorios de Monte Wilson y Las Campanas, y R. Brent Tully, de la Universidad de Hawai en Honolulú, aplicaron la relación de Tully-Fisher en un primer esfuerzo por identificar la causa del movimiento peculiar del Grupo Local. En la distribución local de galaxias, la característica más visible –y presumiblemente la de mayor masa– es el cúmulo de Virgo y su séquito de galaxias, llamado Supercúmulo Local por Gerard de Vaucouleurs, de la Universidad de Texas en Austin. El centro de Virgo, distante entre 40 y 80 millones de años-luz, se encuentra a unos 50 grados de distancia del dipolo de las microondas, lo que sugería que no todo el movimiento del Grupo Local se podía atribuir al Supercúmulo Local. Un objetivo explícito del estudio de Aaronson era, precisamente, hallar qué proporción del movimiento le es atribuible.

Los investigadores cartografiaron los movimientos peculiares de varios cientos de galaxias espirales, a diversas distancias del centro del Supercúmulo Local. Saliendo del Grupo Local en dirección hacia Virgo, las observaciones mostraron que las velocidades aumentaban continuamente. Hacia el lado más alejado de Virgo, la situación se invertía. Las observaciones revelaron, pues, una clara configuración de deceleraciones en el supercúmulo; el exceso de densidad está retardando la expansión de Hubble en esa región del espacio.

El estudio proporcionó una demostración convincente de que los excesos de densidad pueden generar velocidades peculiares en una región grande. Pero, ¿qué nos decía acerca del origen del movimiento del Grupo Local con respecto al fondo de microondas? La velocidad peculiar del Grupo Local implica más de 400 kilómetros por segundo de velocidad en la dirección del Supercúmulo Local. El estudio del grupo de Aaronson, como otros varios posteriores, halló que el movimiento del Grupo Local en la dirección de Virgo vale sólo unos 250 kilómetros por segundo. Aaronson y sus colaboradores supusieron que la discrepancia reflejaba simplemente errores en las medidas y movimientos al azar de la Vía Láctea. No obstante, podría indicar también que el propio Supercúmulo Local tiene una velocidad de, al menos, 150 kilómetros por segundo con respecto al fondo de microondas. Si una masa del tamaño de un supercúmulo completo pudiera adquirir una velocidad apreciable, el universo podría estar desigualmente distribuido, compuesto por enormes trozos en una escala mayor que la que nadie había sospechado. Pero esa idea no se tomó muy en serio en aquella época.

Hacia 1982 estaba ya claro que el Supercúmulo Local imparte un movimiento peculiar al Grupo Local, pero no lo estaba en absoluto que el impulso explicara la velocidad del Grupo Local, ni siquiera en la dirección de Virgo. La parte principal del movimiento está orientada en dirección completamente diferente y, por tanto, requiere otra explicación. Varios astrónomos observaron que, si se resta un vector que representa un movimiento de 250 kilómetros por segundo en la dirección de Virgo del vector deducido del fondo de microondas, el vector de velocidad diferencia apunta en la dirección de Hidra-Centauro, el supercúmulo siguiente en proximidad. Sugirieron, en consecuencia, que este exceso de densidad, que se encuentra a una distancia unas dos veces mayor que el centro del Supercúmulo Local, es el responsable más importante de la distribución de movimientos peculiares. Un molesto corolario de este modelo sencillo y atractivo es que, para dar cuenta de las velocidades observadas, la masa de Hidra-Centauro debería decuplicar la del Supercúmulo Local, una masa mayor que la que su luminosidad sugiere.



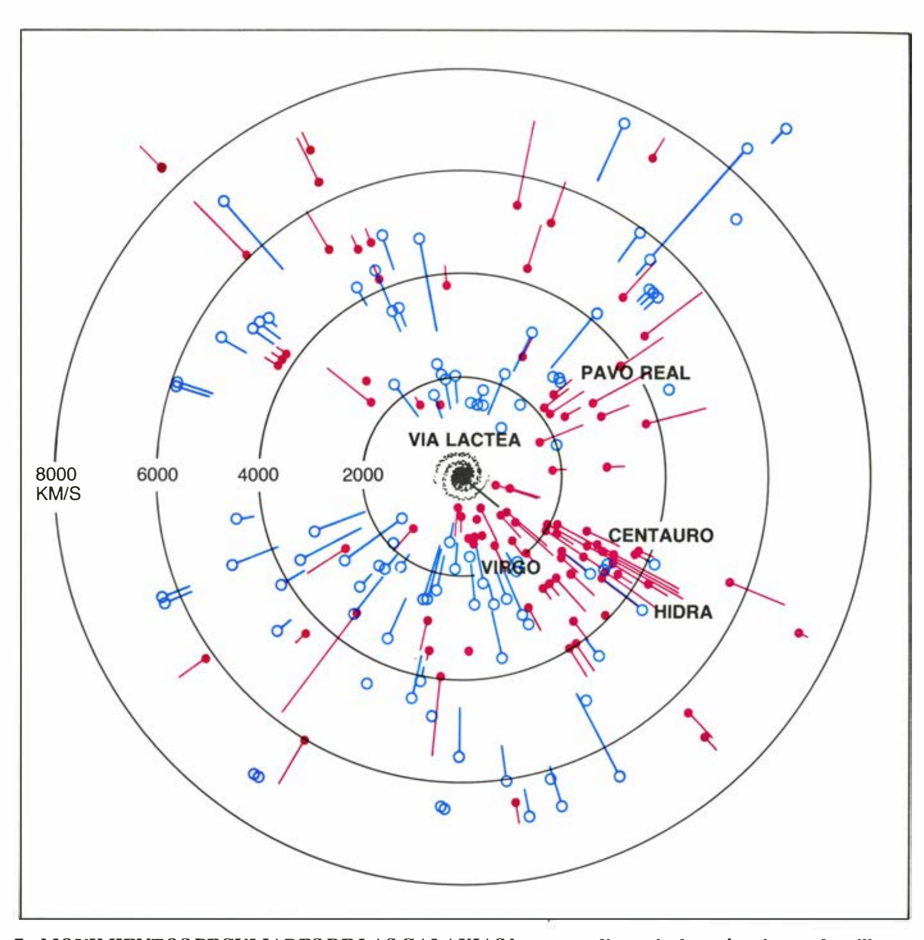
6. RELACION DE TULLY-FISHER; así se llama la relación entre la luminosidad y la velocidad de rotación que caracteriza las galaxias espirales. Sirve de herramienta para estimar las distancias cosmológicas. Dicha relación se deduce de la luminosidad de una galaxia y de la velocidad orbital de las estrellas en sus brazos, determinadas ambas propiedades por la masa de la galaxia. Las galaxias aquí representadas pertenecen al cúmulo de Piscis. Para estimar la distancia a cualquier otra galaxia espiral en función de Piscis, se compara el brillo aparente de la espiral con el de una galaxia de Piscis que posea la misma velocidad de rotación. El gráfico se ha tomado de trabajos de Marc Aaronson, de la Universidad de Arizona, y Jeremy Mould.

La primera comprobación a que se sometió la inferencia anterior fue realizada por David Burstein, de la Universidad del Estado de Arizona, Roger Davies, de los Observatorios Nacionales de Astronomía Optica, Sandra M. Faber, de la Universidad de California en Santa Cruz, Donald Lynden-Bell, de la Universidad de Cambridge, Roberto Terlevich, de los Reales Observatorios de Greenwich, Gary A. Wegner, del Dartmouth College, y el propio autor. El grupo, humorísticamente llamado de los "siete samurais" por nuestros colegas, está empeñado en un estudio de cinco años acerca de las distancias y movimientos peculiares de unas 400 galaxias. Trabajando con telescopios en los Estados Unidos, Chile, Australia y Africa del

Sur, hemos observado galaxias espaciadas más o menos uniformemente en cualquier dirección, contenidas en un volumen de un diámetro superior a los 10.000 kilómetros por segundo (varios cientos de millones de años-luz). Este volumen encierra el supercúmulo de la Hidra-Centauro; el estudio podrá mostrar, pues, si el supercúmulo se halla en reposo mientras el Grupo Local y las galaxias de prueba en la dirección de Hidra-Centauro se mueven atraídos hacia éste.

Nuestro estudio difiere de otros anteriores en la distancia media, bastante mayor, y en la exploración uniforme del cielo. Distínguese también porque emplea galaxias elípticas, para las que hemos desarrollado una nueva técnica de estimar distancias. Igual que el método de Tully-Fisher de las galaxias espirales, nuestra técnica se funda en un parámetro deducido del ensanchamiento Doppler de las líneas espectrales. Las galaxias elípticas no giran; el ensanchamiento resulta, pues, de variaciones en las velocidades a lo largo de la visual de las estrellas de una galaxia elíptica, que siguen trayectorias hacia el centro dirigidas de manera aleatoria.

Medir esa dispersión de velocidades es, en algunos aspectos, tarea más sencilla que medir la velocidad de rotación de una galaxia espiral: el observador no tiene que hacer corrección alguna en razón del ángulo desde el cual se ve la galaxia, ni luchar contra el polvo enturbiador que llena los brazos de una espiral. En las observaciones de las galaxias elípticas de los cúmulos, encontramos que la dispersión de velocidades guarda una buena correlación con el diámetro de la galaxia, definido como el diámetro angular de la región que tiene un brillo medio superficial especificado. A semejanza también de la relación de Tully-Fisher, esta nueva relación permite estimar la distancia de una galaxia de prueba con una exactitud del 20 por ciento; se mide la dispersión de las velocidades y se compara el diámetro aparente de la galaxia con el diámetro de una galaxia equivalente en un cúmulo de referencia.



7. MOVIMIENTOS PECULIARES DE LAS GALAXIAS hasta una distancia de varios cientos de millones de años-luz, correspondientes a una velocidad de recesión de más de 8000 kilómetros por segundo y cartografiadas por el autor y sus colegas. La longitud de la línea asociada con cada galaxia indica la magnitud de su movimiento peculiar; el color rojo simboliza el movimiento de alejamiento de la Tierra; el color azul, de acercamiento a la misma. El movimiento absoluto de la Vía Láctea, de 600 kilómetros por segundo, aparece asimismo señalado aquí. Los datos muestran que las galaxias hasta grandes distancias, incluyendo el cúmulo de Virgo y los supercúmulos de Hidra-Centauro y Pavo Real, se están moviendo aproximadamente en la misma dirección que la Vía Láctea y sus vecinos, y lo hacen más o menos con la misma velocidad.

Cuando estimamos las distancias de las galaxias elípticas de la región de Hidra-Centauro y determinamos qué proporción de corrimiento hacia el rojo refleja el movimiento peculiar, nos sorprendió que la muestra de galaxias de esa región del cielo no se hallara en reposo. Tales galaxias se están moviendo con respecto al fondo de microondas, más de prisa incluso que el Grupo Local y aproximadamente en la misma dirección. En lugar de constituir el atractor buscado, parece que la propia Hidra-Centauro se encuentra sometida a la atracción de un exceso de densidad de mayor masa y más distante. Las galaxias del Supercúmulo Pavo Real, que se encuentran a aproximadamente la misma distancia que la Hidra-Centauro, pero alejadas unos 50 grados al otro lado del plano galáctico, se mueven también, aparentemente, bajo la influencia del mismo atractor remoto.

Así, el movimiento peculiar del Grupo Local es característico de galaxias contenidas en un volumen de espacio mucho mayor que el que se había supuesto. El descubrimiento contradice el razonamiento de Sandage de que la escasez de galaxias que muestran corrimientos hacia el rojo prueba la rareza de los movimientos peculiares. Ahora bien, los grandes movimientos peculiares sí son corrientes, pero su coherencia en grandes volúmenes les impide provocar que las galaxias vecinas converjan en la Vía Láctea.

Nuestra versión, además, se aparta radicalmente de las sugerencias de que el movimiento del Grupo Local refleje fluctuaciones de densidad en escala modesta. De la misma manera que el exceso de densidad más próximo, el Supercúmulo Local, no resultó ser el Gran Atractor, parece, asimismo, que el supercúmulo de Hidra-Centauro, el siguiente candidato en orden de distancia, ha sido declarado inocente. El Gran Atractor parece quedar bastante más alejado y, por tanto, ser de mayor masa de lo que nos habíamos atrevido a imaginar. La verdad es que contamos ahora con un nuevo candidato. En los límites de nuestros datos, a una distancia doble de la de Hidra-Centauro, pero aproximadamente en la misma dirección, las velocidades peculiares de las galaxias parecen disminuir, sugiriendo que nos estamos acercando al propio Gran Atractor.

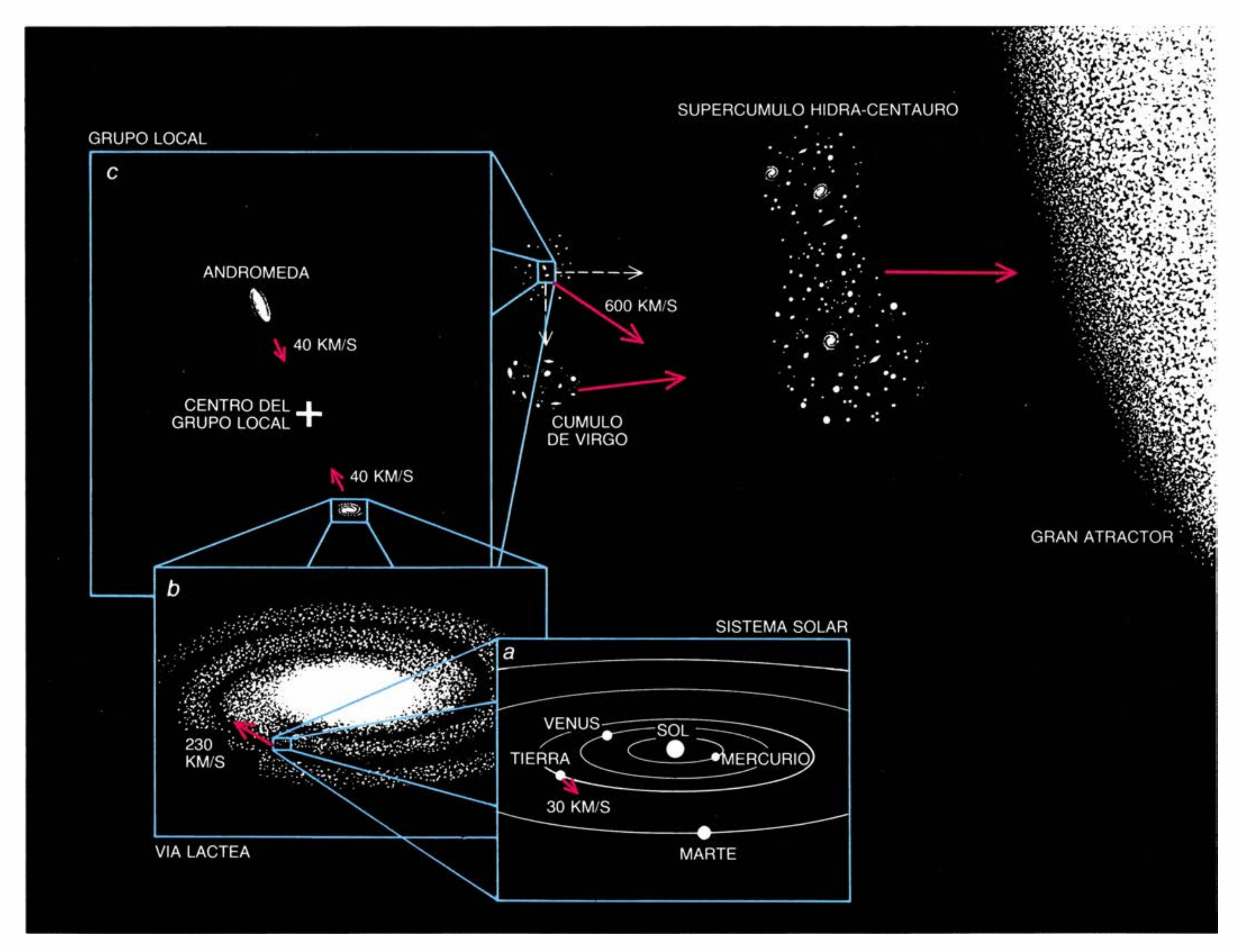
A esa distancia, el Atractor debería

incorporar varias decenas de miles de galaxias extra, es decir, unas 20 veces el exceso de masa del Supercúmulo Local. Se está trabajando para confirmar nuestro resultado, usando la relación de Tully-Fisher para galaxias espirales, y detectar directamente esta masiva concentración de galaxias. Recientemente, el autor midió los corrimientos hacia el rojo de unas 500 galaxias en la dirección del Gran Atractor con el fin de recabar datos de su lejanía. Las galaxias se concentran a una distancia aproximadamente doble de la de Hidra-Centauro.

Nuestro grupo y otros han explorado el universo hasta grandes distancias, en busca de un "sistema inercial de referencia" de galaxias, es decir, un sistema que esté en reposo con respecto a la radiación de fondo de microondas. Decir que todavía no hemos hallado tal sistema equivale a decir que nuestras observaciones no incluyen una porción representativa del universo. No hemos alcanzado la escala para la cual el universo se hace homogéneo.

Hay indicios de que los investigadores están acercándose a esa esquiva escala, en la cual las fluctuaciones de densidad son pequeñas y las velocidades peculiares son cero en promedio. El grupo de Aaronson, empleando la relación de Tully-Fisher, buscó movimientos peculiares en galaxias espirales pertenecientes a 10 cúmulos situados a distancia aproximadamente doble de la de las más distantes galaxias elípticas de nuestra muestra. Dentro del margen de error, la muestra de galaxias espirales parece estar en reposo con respecto al fondo de microondas. Sin embargo, como los cúmulos de galaxias pueblan sólo una estrecha banda del cielo, se necesitan estudios subsiguientes, que cubran una mayor muestra, para confirmar el descubrimiento.

Dondequiera que resulte estar el sistema inercial de referencia, hemos establecido ya que, incluso en una escala de cientos de millones de años-luz, el universo está constituido por regiones de densidad excesiva, así como por regiones relativamente vacías. Si se confirman nuestros resultados, apuntarán a estructuras mucho mayores que las cartografiadas directamente, tales como las células del "universo de burbujas" descrito, en 1986, por Huchra, Valérie de Lapparent y Margaret J. Geller, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Esas estructuras a menor escala representan ya un serio desafío a los modelos teóricos acerca de los sucesos del universo pri-



8. MOVIMIENTO ABSOLUTO DEL GRUPO LOCAL (la Vía Láctea y las galaxias vecinas) se superpone a movimientos relativos de menor escala. Un observador terrestre debe tener en cuenta los 30 kilómetros por segundo a los cuales describe la Tierra su órbita en torno al Sol (*a*), los 230 kilómetros por segundo del progreso del sistema solar alrededor del centro de la Vía Láctea (*b*) y los 40 kilómetros por segundo a los que la Vía Láctea es atraída hacia la galaxia de Andrómeda, su vecina más próxima (*c*). Mientras tanto, el Grupo Local se mueve a 600 kilómetros por segundo con respecto a la trama del espacio. La atracción gravitatoria del cúmulo de Virgo puede dar cuenta de una componente del movimiento, pero hay una componente mucho mayor dirigida hacia el supercúmulo Hidra-Centauro, el cual está también en movimiento. Recientes resultados sugieren que tanto el Grupo Local como Virgo e Hidra-Centauro se encuentran aprisionados dentro de la atracción gravitatoria de una vasta concentración de galaxias, a una distancia casi doble de la de Hidra-Centauro: el Gran Atractor.

mitivo, cuando se debieron originar las fluctuaciones de densidad.

Después de todo, tales teorías deben ser también capaces de dar cuenta de la estructura en pequeña escala de las galaxias y de la uniformidad del fondo de microondas, que limita las clases de heterogeneidad que pudieron haber existido en el primitivo universo. Muchas de tales teorías suponen la existencia de alguna forma de materia oscura: materia no luminosa que, según muchos astrofísicos, constituye entre el 90 y el 99 por ciento de la masa del universo [véase "Materia oscura del universo", de Lawrence M. Krauss; Investigación y Ciencia, febrero de 1987]. Una partícula ya observada, el neutrino, y cierto número de partículas hipotéticas, se han propuesto como portadoras de la masa que falta, y ciertos modelos basados en varios candidatos a materia oscura predicen diversos espectros de fluctuaciones de densidad en un universo, que, creado por la gran explosión inicial, se expande y enfría. Sin embargo, ni siquiera las teorías de más éxito han logrado satisfacer simultáneamente todas las ligaduras observacionales.

Ulteriores observaciones de movimientos peculiares echarán los cimientos para una sólida comprensión teórica de la formación y primitiva evolución del universo. Resulta incluso posible que extiendan nuestra comprensión a sucesos en el otro extremo del tiempo. Muchos investigadores teóricos proponen que la densidad de masa del universo es exactamente la que hace falta para que la expansión cosmológica se dirija hacia su detención en un futuro distante, propuesta que contiene también poderosas implicaciones con respecto a los procesos ocurridos durante la gran explosión. Las estimaciones de la densidad de masa basadas en observaciones de una única galaxia, o de un grupo de galaxias, dan sistemáticamente valores demasiado bajos para frenar la expansión de manera efectiva. Nuestro estudio y otros intentos para determinar la densidad de masa en las escalas mayores apuntan, sin embargo, a una densidad global próxima al valor crítico, y tal vez a un universo en perfecto equilibrio.

La exploración del universo es una empresa humana. Escrito ya este artículo, Marc Aaronson, cuyo trabajo figura prominentemente aquí, murió en un accidente en el telescopio de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak. Era un amigo y respetado colega; el autor le echará de menos.

Retrotranscripción

Hace años se descubrió que un grupo de virus convertían el ARN en ADN, invirtiendo la secuencia normal de los procesos moleculares. Según parece ahora, también pueden hacerlo otros virus y muchos organismos superiores

Harold Varmus

El material hereditario de casi todos los seres vivos está formado por dos cadenas de ADN entrelazadas en una doble hélice. Los genes que allí se encuentran controlan la actividad celular mediante dos procesos: la transcripción, en la que el ADN se copia a ARN, y la traducción, proceso en el que el ARN dirige la síntesis de proteínas. Esa secuencia ADN-ARN-proteína resulta ser prácticamente universal.

Existen, no obstante, algunas excepciones. En ciertos grupos de virus, el material genético es ARN y no ADN. El genoma de esos virus, que los hay de animales, plantas y bacterias, puede ser mono o bicatenario. En esos casos, el ARN guarda y transmite información de modo similar al ADN. El ciclo de vida de los virus de ARN no difiere mucho, por tanto, del de los virus de ADN. La mayoría de ellos simplemente elude la transcripción.

Una subclase de virus de ARN, los denominados retrovirus, se apartan más de la secuencia convencional: pueden fabricar ADN a partir de ARN. De hecho, lo primero que hace un retrovirus cuando infecta una célula es obtener una copia de su genoma de ARN en ADN. Este ADN vírico se inserta en el ADN de la célula hospedadora y dirige la producción de nuevos virus.

El potencial patogénico de la familia de los retrovirus es muy extenso y diverso. Entre sus miembros se cuentan tanto los agentes que producen leucemias en ratones y pollos como el virus causante del SIDA. La característica diferencial de esos virus, su capacidad de convertir ARN en ADN, se denomina retrotranscripción, o transcripción inversa.

La retrotranscripción se descubrió hace 17 años. Durante casi una década, los investigadores creyeron que el fenómeno era exclusivo de retrovirus, por lo que el estudio del proceso se restringió a ellos y a las células animales que infectaban. Más recientemente, no obstante, se ha detectado retrotranscripción en otro virus, e incluso en células de levaduras, insectos y mamíferos no infectadas. La existencia de retrotranscripción fuera del ciclo de vida de un virus explicaría una serie de confusas observaciones, si bien, por otra parte, plantearía otros tantos interrogantes.

Como todos los virus, los retrovirus usurpan la maquinaria genética de la célula que infectan, obligándola a fabricar réplicas del material genético del invasor y a expresar sus genes. Con proteínas de la cápside y ARN se ensamblan las nuevas partículas víricas. La mayoría de los virus de ARN disponen de un breve período reproductivo antes de que la célula infectada muera. Las infecciones por retrovirus, en cambio, son más estables y resultan menos dañinas, a menudo reproduciéndose los virus en grandes cantidades sin matar al hospedador.

En 1970, Howard M. Temin, de la Universidad de Wisconsin, e, independientemente, David Baltimore, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrieron en ciertos virus de ARN la presencia de una enzima capaz de fabricar moléculas de ADN bicatenario a partir de moldes de ARN unicatenario. La enzima se bautizó retrotranscriptasa y, los virus que la llevaban, retrovirus.

Años antes, Temin ya había apuntado que, en la célula infectada, la forma estable de los genes de los retrovirus no era de ARN, sino de ADN. Entonces, sin embargo, no se conocía enzima capaz de copiar el ARN en ADN. El descubrimiento de la retrotranscriptasa avaló la teoría de Temin. Estudios posteriores demostraron que los genes de los retrovirus se integraban, en forma de ADN, en los cromosomas de las células hospedadoras. Desde su punto de integración, el ADN, o provirus, dicta las instrucciones de producción de los nuevos virus.

Esos primeros resultados avivaron el interés por la retrotranscriptasa. Hoy se conoce su comportamiento bioquímico, sus requerimientos de activación y su respuesta ante gran número de fármacos. Se sabe, por ejemplo, que, para iniciar la síntesis de ADN, la retrotranscriptasa necesita pequeños trozos de ARN, que actúan como "cebadores", y que algunos de esos trozos los obtiene cortando moléculas de ARN vírico de mayor tamaño.

En los primeros estudios no se consideró la posibilidad de que se diera actividad retrotranscriptasa fuera del ámbito de los retrovirus. Los primeros indicios sobre el alcance real de dicho proceso datan de finales de los años 70 y nacen de los estudios bioquímicos del ADN retrovírico sintetizado por la retrotranscriptasa. En el laboratorio que compartía con J. Michael Bishop, en la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, y en el de John M. Taylor, del Instituto para la Investigación del Cáncer, de Philadelphia, se fue dilucidando gradualmente la estructura de ese ADN, con sorprendentes resultados. Nuestros experimentos ponían de manifiesto que las formas bicatenarias lineales del ADN del retrovirus poseían, en sus dos extremos, secuencias idénticas, y que tal identidad afectaba a varios centenares de nucleótidos. Esas regiones constituyen las "grandes repeticiones terminales", o LTR (por Long Terminal Repeats).

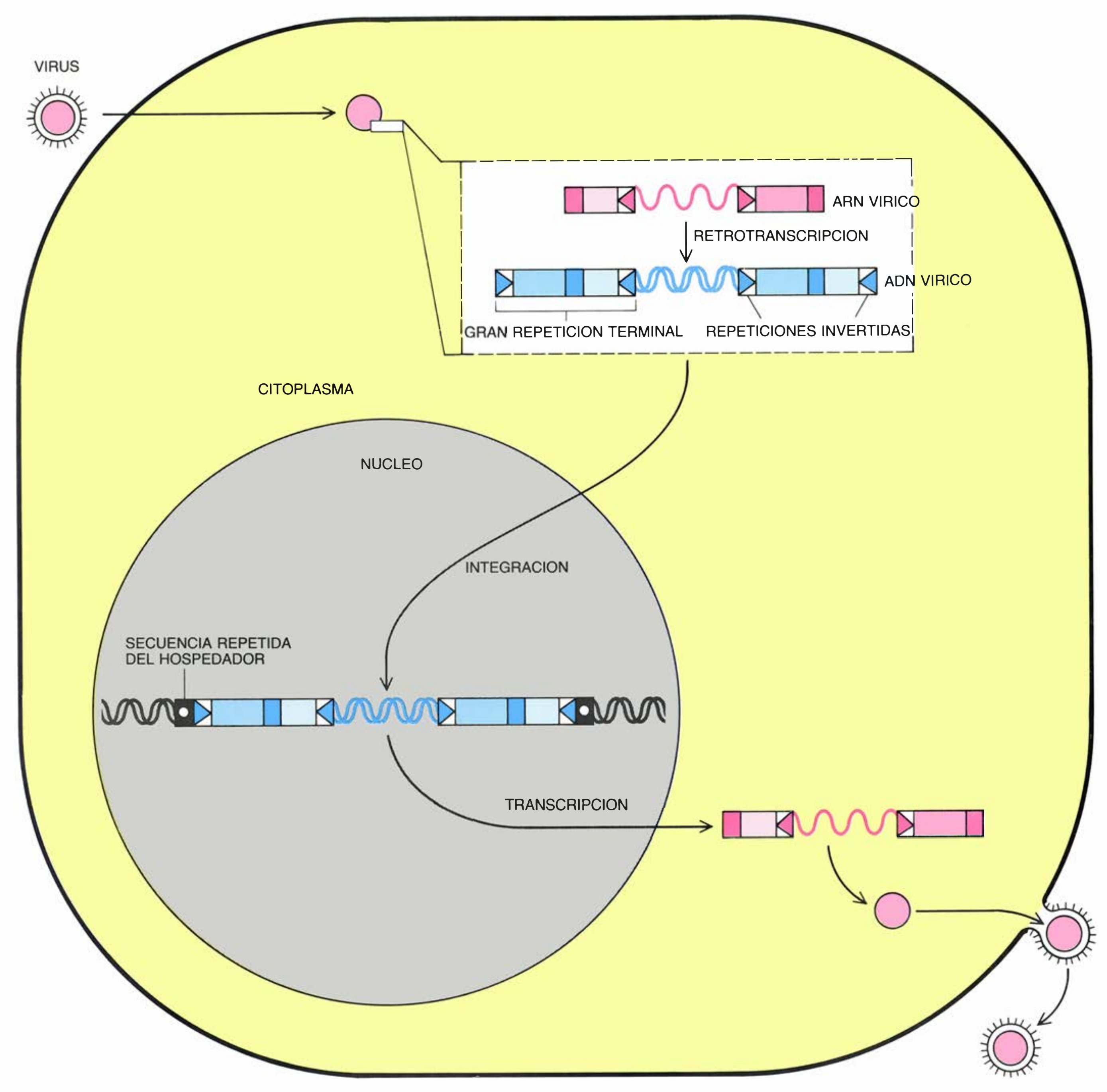
Las primeras descripciones de las grandes repeticiones terminales eran fruto de una caracterización poco exhaustiva de las escasas copias de ADN vírico encontradas en las células infectadas. Varios laboratorios, incluido el mío, realizaron posteriormente determinaciones más exactas, en las que se



1. PARTICULAS DE CELULAS DE LEVADURA, constituidas en fábricas de retrotranscripción. Las partículas (*izquierda*) semejan retrovirus, aunque no las han generado elementos genéticos de los propios cromosomas de la célula. El ADN que allí se fabrica se inserta posteriormente en los cromosomas.

confirmó que las grandes repeticiones terminales situadas en cada uno de los extremos de la molécula de ADN eran, efectivamente, idénticas nucleótido a nucleótido. Se comprobó, además, que algunas de las secuencias más extremas de las LTR eran idénticas leídas en sentido contrario: las repeticiones invertidas. Más tarde se comprobó que las LTR del ADN integrado estaban flanqueadas por la misma secuencia corta, perteneciente al genoma del hospedador. Se diría que la secuencia nucleotídica del cromosoma hospedador por donde se producía la integración se duplicaba al insertarse el ADN vírico.

Importaba la caracterización de las LTR, repeticiones invertidas y duplicaciones de secuencias del ADN hospedador para conocer el ciclo biotípico de los retrovirus, pero su conocimiento planteaba, además, nuevos e interesantes interrogantes. Los análisis revelaron varias similitudes entre el ADN retrovírico y ciertos elementos genéticos que constituían rasgos permanentes, aunque móviles, de los cromosomas de la mayoría de los organismos, si no de todos. Se trata de los llamados elementos transponibles, o transposones, que se han detectado en bacterias, levaduras, vegetales, insectos y vertebrados. Muestran tendencia a cambiar de posición dentro del genoma. Los elementos transponibles suelen presentar en sus extremos alguna secuencia "especial", y muchos tienen LTR, repeticiones invertidas y pequeñas duplicaciones de secuencias en los sitios de integración.

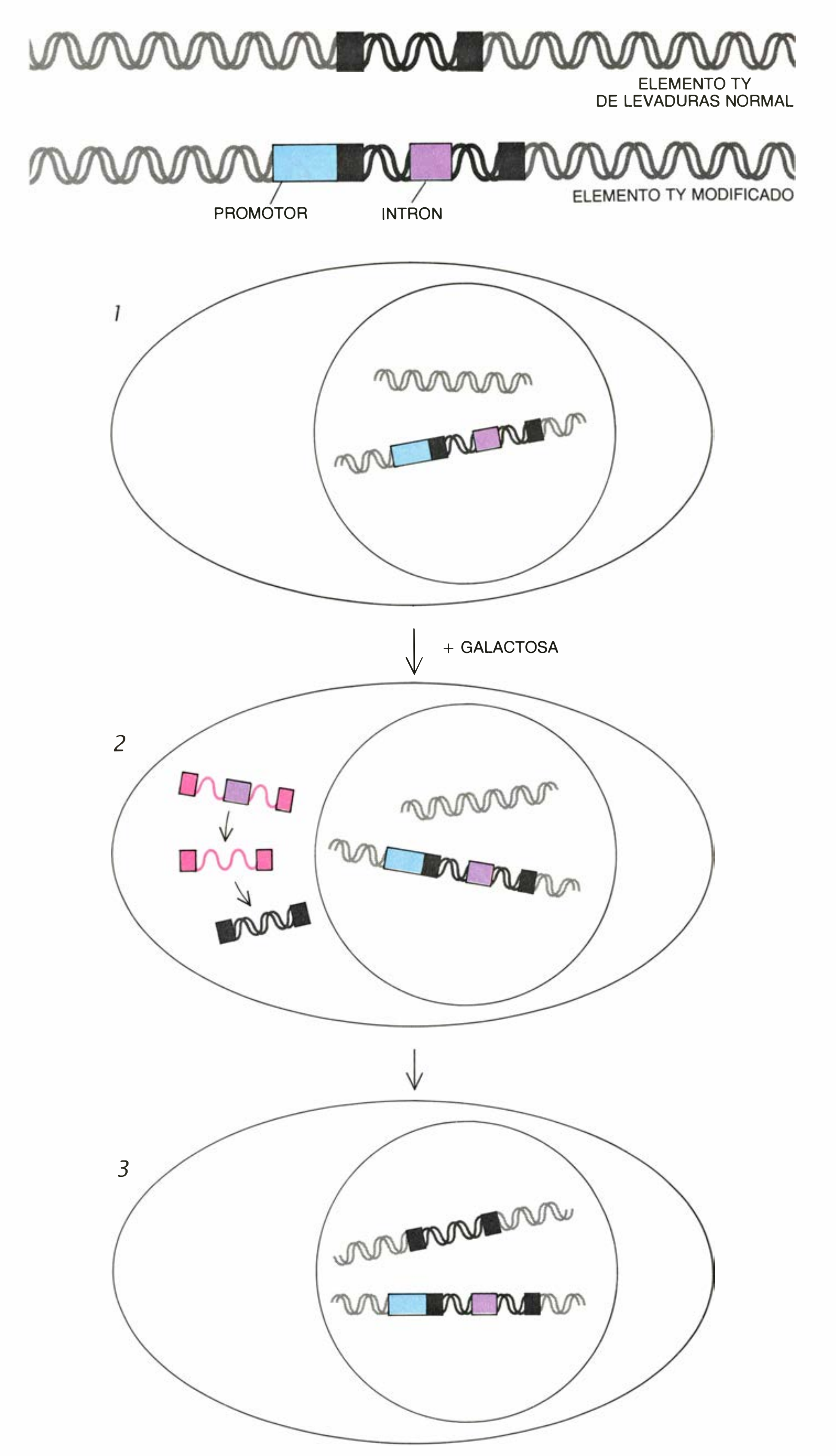


2. CICLO DE VIDA DE UN RETROVIRUS, que se caracteriza por la retrotranscripción de ARN (*rojo*) en ADN (*azul*). El ADN retrovírico, que incluye genes para varias proteínas, porta en sus extremos secuencias idénticas, denominadas grandes repeticiones terminales, que a su vez contienen las llamadas repeticiones invertidas. Cuando los genes retrovíricos se integran en el ADN del hospedador (*círculo en gris*), la secuencia que sirve de diana para la integración se duplica. Sólo algunas de las secuencias repetidas están representadas en el ARN transcrito, que se empaqueta finalmente junto con proteínas víricas.

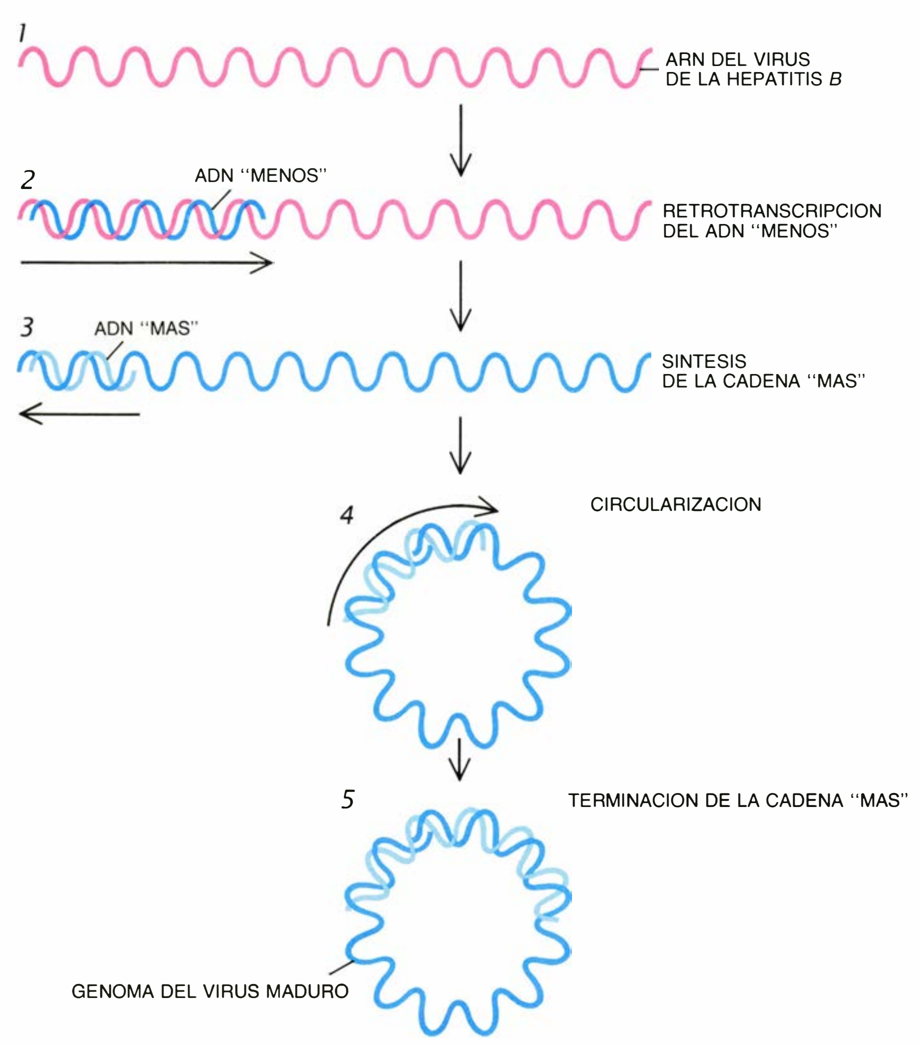
Tales semejanzas entre provirus y elementos transponibles apuntaban la posible existencia de retrotranscripción en el mecanismo que utilizan ciertos elementos para moverse. No constituían las únicas pruebas en favor de tal hipótesis. En los transposones de levaduras y moscas, las secuencias nucleotídicas de las repeticiones invertidas más próximas a los límites interiores de las LTR eran muy similares a las encontradas en una posición análoga en los provirus. La importancia de estas secuencias radica en que por ellas comienza la retrotranscripción del ADN retrovírico y tiene lugar la integración del provirus. La comparación, mediante ordenador, de las secuencias proteicas determinadas por tales elementos móviles ha revelado, además, un estrecho parecido entre esos productos génicos y las proteínas retrovíricas responsables de la retrotranscripción, integración y maduración de las proteínas [*véase las figuras 5 y 6*].

A pesar de lo sugestivo de tales observaciones, había que seguir indagando. Algunos investigadores centraron su atención en el elemento transponible de células cultivadas de la mosca del vinagre conocido por *copia*. En 1981, Andrew Flavell y David Ish-Horowicz, del Imperial Cancer Research Fund de Londres, pusieron a punto una técnica de detección de formas no integradas de ADN de *copia*. Descubrieron que ese ADN no integrado se parecía mucho al ADN retrovírico no integrado, presente en células recién infectadas. Cabía la posibilidad, por supuesto, de que el ADN no se hubiese generado por retrotranscripción, sino mediante un mecanismo distinto. Los estudios funcionales del elemento móvil Ty, de levaduras, brindaron argumentos más consistentes en favor de la retrotranscripción.

En dichos experimentos, realizados por Jef D. Boeke, David J. Garfinkel y Cora A. Styles en el laboratorio de Gerald Fink, del MIT, se explotó las propiedades de las entidades genéticas conocidas por promotores e intrones. Los promotores son secuencias de ADN que regulan la expresión de regiones contiguas. Boeke, Garfinkel y Styles situaron junto a Ty un promotor que estimulaba la transcripción de dicho elemento cuando las células de levaduras se cultivaban en presencia del azúcar galactosa. De esta forma, controlando la cantidad de galactosa presente en el medio de cultivo podían manipular la expresión de Ty. Cuanta más



3. EXPERIMENTOS CON TY, que evidenciaron la participación de la retrotranscripción en la transposición, o salto de un cromosoma a otro, del elemento genético de la levadura conocido como Ty (*gris oscuro*). Ty se modificó con la adición de un promotor del gen de la galactosa (*azul*), que regula la transcripción en función de la cantidad de azúcar presente en el medio donde se cultiva la levadura. Se le añadió también un intrón (*violeta*), una secuencia de ADN carente de información, así se cree, que se elimina del ARN una vez transcrito. Las levaduras que portaban elementos Ty modificados se cultivaron en presencia de galactosa (*1*). Cuando se buscaron las nuevas copias de elementos Ty, se encontró que el número de transposiciones variaba en función de la cantidad de galactosa, y que los elementos Ty que habían sufrido transposición carecían de intrones. Deducíase de todo ello que los elementos Ty de la levadura debían haberse transcrito en ARN, madurado y retrotranscrito posteriormente (*2*), antes de insertarse en otro cromosoma (*3*).



4. SINTESIS DEL GENOMA DEL VIRUS DE LA HEPATITIS *B*, que pone de manifiesto el papel desempeñado por la retrotranscripción en el ciclo de vida de un virus de ADN. El genoma anular del virus está formado por dos cadenas de ADN, denominadas "más" (*azul claro*) y "menos" (*azul oscuro*). La cadena "menos", la más larga, se retrotranscribe (*1, 2*) a partir del ARN vírico (*rojo*). La síntesis de la cadena "más" comienza en las proximidades de un extremo de la cadena "menos" (*3*), y persiste tras la circularización (*4*). En el genoma maduro (*5*), la cadena "más" está incompleta y los extremos de la "menos" se solapan.

galactosa se añadía, más ARN de Ty se sintetizaba.

Boeke y sus colegas variaron la concentración de galactosa en el medio de cultivo de las levaduras y a continuación buscaron indicios que delatasen posibles signos de transposición. Pudieron así demostrar que la aparición de un elemento Ty en una nueva posición dependía de la cantidad de galactosa presente en el medio de cultivo y, por tanto, de la cantidad de ARN que se sintetizaba. Los resultados sugerían que la transposición del ARN de Ty requería la colaboración de un intermediario de ARN.

En ese mismo sentido apuntaban los resultados de otros experimentos realizados por los investigadores del MIT, en los que se insertó un intrón en el elemento Ty modificado. Los intrones son segmentos de ADN carente de información que se encuentran desperdigados por los genes de los organismos superiores. Una vez transcrito el gen en ARN, los segmentos de ARN correspondientes a los intrones se eliminan, originándose una molécula de ARN "mensajero" coherente y maduro. Boeke y sus colegas observaron que en las nuevas copias de ADN de Ty transpuesto habían desaparecido los intrones que ellos introdujeron. En algún momento del proceso de transposición se había perdido el intrón. Las enzimas encargadas de los cortes y empalmes necesarios para eliminar los intrones no escinden el ADN, sino sólo el ARN. Cabía inferir, por tanto, que la transposición del ADN de Ty ocurría vía ARN. El vínculo entre provirus y elementos móviles, como los Ty de levaduras, sugirió un nuevo nombre para dichos elementos: retrotransposones.

Los provirus han dejado también su huella en otros organismos. La mayoría de las células de los vertebrados, por ejemplo, llevan genes retrovíricos. En ciertas especies, incluidos el hombre y el ratón, se han encontrado centenares, si no miles, de copias. Se desconocen los orígenes de esos provirus endógenos. La mayoría no puede producir partículas víricas infecciosas y parece que muchos no conservan los genes intactos. Algunos provirus endógenos, sin embargo, producen en las células partículas asociadas con la actividad retrotranscriptasa. Tales partículas, como las producidas por los retrotransposones de levaduras e insectos, generan nuevas copias de ADN a partir de ARN y se insertan arbitrariamente en el cromosoma hospedador.

Esa promiscua integración de ADN supone una amenaza para la célula hospedadora, ya que en el sitio de integración suelen producirse mutaciones. La mutación quizá desbarate la función normal de un gen, o modifique su nivel de expresión y actividad. En efecto, muchos retrovirus inducen tumores cuando, a raíz de su integración, un gen celular normal pasa a expresarse en niveles inusuales, convirtiéndose en un "oncogén", o gen cancerígeno.

La persistencia, en el genoma, de elementos genéticos foráneos potencialmente perjudiciales resulta paradójica. ¿Por qué se conservan? ¿Por qué abundan tanto? ¿Confieren al hospedador alguna ventaja selectiva, o sólo sobreviven si no causan mutaciones perjudiciales al hospedador? Finalmente, ¿puede el hospedador protegerse frente a los efectos deletéreos de dichas mutaciones?

Todas esas preguntas, de obvio interés, no hallaron fácil respuesta experimental. Los investigadores no han abandonado el empeño, y los datos que se han ido acumulando durante los últimos cinco años han revelado que el alcance de la retrotranscripción es mucho mayor de lo que se pensó en principio. Varias características inusuales de ciertos virus de ADN y genes de organismos superiores se atribuyen ahora a la existencia de actividad retrotranscriptasa. En esos casos, las secuencias víricas y celulares carecen de algunos de los elementos esenciales de los provirus, pero los indicios sobre la existencia de retrotranscripción resultan bastante convincentes.

En 1982, William S. Mason y Jesse Summers, del Instituto de Investigación del Cáncer, demostraron que los virus de la hepatitis *B* se replicaban ayudándose de la retrotranscripción. Nadie intuiría su parentesco con los retrovirus. Los virus de la hepatitis *B*, cuya versión humana es un importante patógeno, no son virus de ARN. Po-

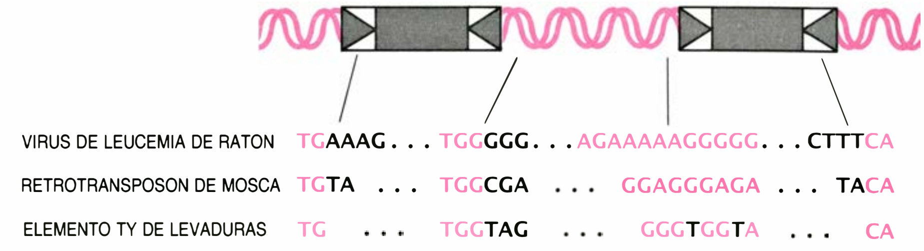
seen un genoma de ADN bicatenario y circular. Todas las células portan polimerasas de ADN (enzimas que sintetizan ADN a partir de ADN), que los virus utilizan para replicarse. ¿Por qué ha adoptado el virus de la hepatitis *B* un modo de actuación distinta?

El estudio de la estructura del genoma del virus, cuyo anillo de ADN posee una organización peculiar, brindó las primeras explicaciones. Ninguna de las dos cadenas forma un anillo cerrado, y una de ellas, la "más", es más corta que la otra, la "menos". La cadena "más" porta un fragmento de ARN unido a uno de sus extremos, mientras que la "menos" porta un fragmento proteico. Mason y sus colegas observaron también, en células de hígado infectadas por el virus, que el número de cadenas "menos" era superior al de cadenas "más".

Esas asimetrías entran en conflicto con el mecanismo de replicación del ADN que goza de aceptación general, según el cual las dos cadenas de la doble hélice se duplican simultáneamente y en la misma proporción. En la retrotranscripción, sin embargo, puede romperse el equilibrio, ya que las cadenas de ADN se sintetizan en secuencia, no simultáneamente. La primera cadena de ADN se sintetiza a partir de un molde de ARN monocatenario; la segunda se copia de la primera.

Si el ADN genómico de un virus de hepatitis *B* se regenera mediante retrotranscripción, primero debe haberse transcrito en ARN. Si ello es así, todas las piezas encajan en su lugar. Las diferencias estructurales entre las dos cadenas de ADN reflejarían los diferentes moldes utilizados para construir cada una de ellas. El retraso o la terminación prematura del proceso de síntesis romperían el equilibrio numérico.

Ha resultado difícil obtener pruebas directas de la ocurrencia de la retrotranscripción durante la fase de replicación del virus de la hepatitis *B*. El cultivo de virus en células constituye un logro reciente, y esa tardanza ha dificultado la aproximación experimental tradicional. En 1982, Mason y Summers obviaron ese obstáculo obteniendo virus directamente del tejido infectado: recogieron partículas inmaduras de virus de hepatitis *B* de hígado de pato infectado y las incubaron con nucleótidos radiactivos, específicos de ADN. Los nucleótidos radiactivos se incorporaban en cualquier ADN sintetizado por las partículas; ello facilitó, gracias a la radiactividad que emitían, la detección de nuevo ADN bicatenario y de los híbridos ADN-ARN.



5. SIMILITUD DE SECUENCIAS entre los ADN de un virus que produce leucemia, un retrotransposón de moscas, y el elemento Ty de levaduras. Dicho parecido apunta hacia un origen común de todos ellos. Las letras representan las cuatro bases del ADN: adenina, timina, guanina y citosina. Las bases que coinciden en las repeticiones invertidas y regiones contiguas se indican en color. Se colorean también las zonas ricas en adeninas y guaninas, de estructura similar. Resulta difícil apreciar la repetición invertida (*TG...CA*), ya que únicamente se muestra en la ilustración una de las cadenas; la cadena hermana se leería *AC...GT*.

Como Mason y Summers esperaban, en condiciones normales las partículas víricas aisladas fabricaban cadenas "más" y "menos". Seguidamente añadieron actinomicina *D*, un antibiótico que suspende la síntesis a partir de moldes de ADN. En presencia del antibiótico cesaba la síntesis de cadenas "más", pero no la de cadenas "menos", señal de que la síntesis de estas últimas se llevaba a cabo a partir de un molde de ARN, y no de ADN. Así se confirmó, en parte, al observar que las cadenas "menos" recién sintetizadas se emparejaban con ARN: la densidad de las hélices híbridas era intermedia entre las del ADN y ARN puros.

Un año más tarde vinieron a sumarse nuevos argumentos en favor de la retrotranscripción. Takashi Miyata y sus colegas, de la Universidad de Kyushu, analizaron por ordenador las proteínas retrovíricas y las de los virus de la hepatitis *B*. Descubrieron semejanzas importantes entre las enzimas retrovíricas y una proteína determinada por un gen del virus de la hepatitis *B* sin función conocida. La mayoría de los virólogos supone hoy que esa proteína es una retrotrancriptasa. No obstante, parece actuar de una forma algo diferente de como lo hace su homóloga en los retrovirus. Así, por ejemplo, no dota al ADN de las LTR que le sirven al ADN retrovírico para integrarse en los cromosomas del hospedador.

La revolución que supuso el descubrimiento del inesperado papel de la retrotranscripción en los virus de la hepatitis *B* tuvo pronto su continuación en otro alejado protagonista, un virus de plantas denominado virus del mosaico de la coliflor (CaMV). Aunque las pruebas, si bien menos abrumadoras, eran igualmente convincentes. El genoma del virus de la coliflor, como en el caso del de la hepatitis *B*, es un anillo de ADN bicatenario. Las secuencias que rodean los sitios de iniciación de la síntesis de ADN del CaMV son similares a aquellas a las que, en los genomas retrovíricos, se unen los cebadores. Además, una de las proteínas del virus de la coliflor se parece a las retrotranscriptasas de retrovirus y virus de la hepatitis *B*. Roger Hull y Simon N. Covey, del Instituto inglés John Innes, han caracterizado intermediarios de la replicación en el virus de la coliflor, que han resultado ser análogos a los observados en las infecciones retrovíricas. Según otros investigadores, se detecta actividad retrotranscriptasa asociada con partículas del CaMV.

En los ejemplos expuestos hasta ahora, la retrotranscripción parece depender de una enzima aportada por un virus invasor o por los correspondientes elementos genéticos. Según se cree, otros elementos menos especializados, presentes en cromosomas de mamíferos, pueden deber su existencia a retrotranscripción mediada por enzimas de origen incierto. Estos sorprendentes descubrimientos surgieron co-

VIRUS DE LEUCEMIA DE RATON	P Q G F K N S P . . . F R . . . Y V D D L L L . . . K K . . . Y L G
RETROTRANSPOSON DE MOSCA	P F G L K N A P . . . I R . . . Y L D D I I V . . . D K . . . F L G
ELEMENTO TY DE LEVADURAS	L Y E L K Q S G . . . V R . . . F V D D M V L . . . E K . . . N L G
VIRUS DE LA HEPATITIS *B*	P M G V G L S P . . . V R . . . Y M D D V V L . . . N K . . . F M G
VIRUS DEL MOSAICO DE LA COLIFLOR	P F G L K Q A P . . . F R . . . Y V D D I L V . . . K K . . . F L G

6. SECUENCIAS PROTEICAS determinadas por un retrovirus, retrotransposones de mosca y levadura, así como por dos virus de ADN que hacen uso de la retrotranscripción; también se observan semejanzas. Cada letra representa uno de los 20 aminoácidos que forman las proteínas. Los aminoácidos que coinciden se indican en rojo; los que cumplen una función semejante, sin ser idénticos, se ilustran en color rosa. Las secuencias proteicas se dedujeron a partir de la de un gen que determina la enzima retrotranscriptasa.

lateralmente en unos estudios cuyo fin era catalogar los genes de los cromosomas de ratón que determinan las proteínas sanguíneas denominadas globinas.

En los vertebrados, los genes de las globinas suelen agruparse en dos cromosomas; las regiones con contenido informativo (exones) aparecen interrumpidas por dos intrones. Cuando Aya y Philip Leder, a la sazón en el Instituto Nacional estadounidense de la Infancia y Desarrollo Humano, y Elio F. Vanin, Oliver Smithies y sus colaboradores, de la Universidad de Wisconsin en Madison, buscaron esos genes utilizando sondas moleculares, encontraron una secuencia de ADN anómala, parecida al gen de la globina, pero con algunas diferencias importantes. Tal secuencia carecía de intrones y estaba repleta de mutaciones que impedían la síntesis normal de proteína. Además, se encontraba en un cromosoma distinto del que alojaba a los genes de las globinas.

Uno de los modelos propuestos para explicar el extraño hallazgo postulaba la existencia de la retrotranscripción. El ARN de globina, una vez maduro, se retrotranscribiría, insertándose al azar por los cromosomas del ratón la correspondiente copia de ADN (sin intrones). Desprovisto del promotor que gobierna su expresión en su localización normal, el nuevo fragmento dejaría de transcribirse, y cuando un gen no se expresa no existe presión selectiva que impida la acumulación de mutaciones en su secuencia.

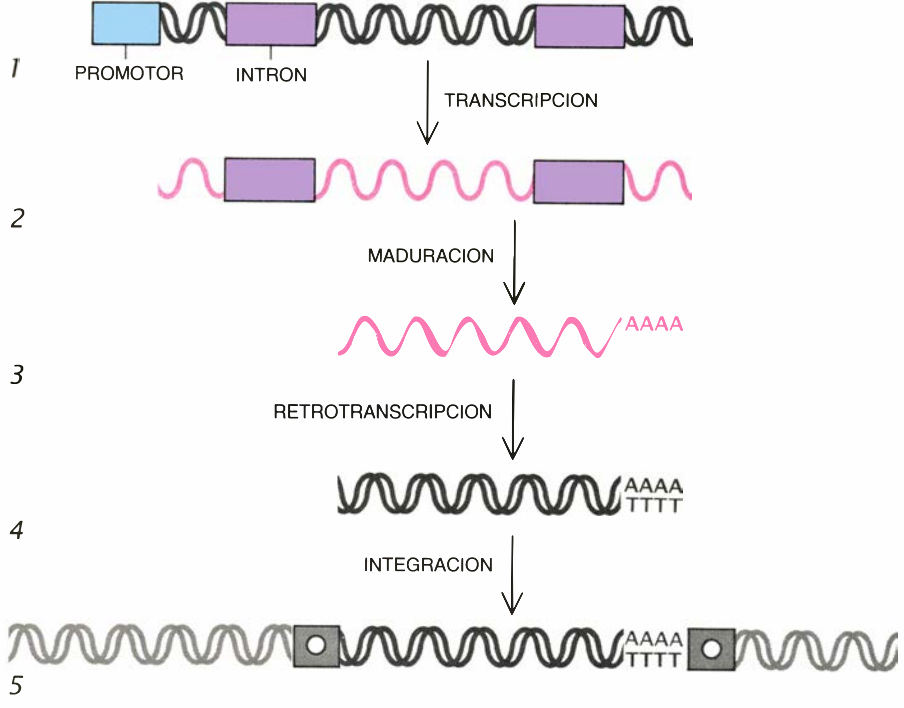
Los contenedores de "retropseudogenes" descubiertos en años sucesivos dieron solidez al modelo. Esos casos aportaron además nuevas pruebas en favor de la retrotranscripción. Así, por ejemplo, algunos de los retropseudogenes de la globina poseen en uno de sus extremos una secuencia de ADN, en la que se repite muchas veces el nucleótido adenilato monofosfato. El ADN para la globina suele carecer de esa secuencia, pero la posee el ARN mensajero correspondiente, en forma de cola de "poli-*A*", cola que se le añade durante el proceso de maduración. La presencia, por tanto, de la cola de poli-*A* en el retropseudogén es un indicio que denuncia, con bastante firmeza, su origen en el ARN. Algunos retropseudogenes presentan también las repeticiones de secuencias del hospedador características de los provirus y retrotransposones.

El hallazgo de retropseudogenes ha permitido establecer una serie de criterios para descubrir otros productos de retrotranscripción. En los últimos cinco años se han encontrado varias clases de secuencias celulares nativas portadoras de la cola poli-*A*, la duplicación de la secuencia del hospedador y que, además, se encuentran dispersas aleatoriamente por los cromosomas, sello característico de las secuencias de ADN que derivan de ARN. A diferencia del gen de la retropseudoglobina, no se sabe a qué gen conocido asimilar la mayoría de esos nuevos "elementos dispersos"; algunos parecen determinar parte o la totalidad de la enzima retrotranscriptasa. En un solo genoma puede haber centenares o miles de secuencias como ésas. De hecho, los productos de la retrotranscripción, incluidos los retrotransposones, provirus endógenos, retropseudogenes y otros elementos dispersos, podrían representar hasta el 10 % del genoma humano.

Si la retrotranscripción desempeña realmente un papel tan importante en la formación de los genes de las células de mamíferos, se multiplican las preguntas por resolver. ¿De dónde procede la retrotranscriptasa que origina retropseudogenes y elementos dispersos? ¿Qué enzima selecciona y prepara al ARN celular para la retrotranscripción? ¿Qué enzima interviene en la integración del nuevo ADN? ¿Con qué frecuencia se da la retrotranscripción? ¿Qué sentido tiene el proceso en el marco del programa funcional de la célula?

Este último interrogante pone sobre el tapete el aspecto más especulativo de las investigaciones sobre retrotranscripción: los orígenes evolutivos de la información genética. Algunos biólogos sostienen que el ARN fue la primera molécula hereditaria con significado, y que el ADN se desarrolló con posterioridad [véase "ARN", por James E. Darnell, Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1985]. La versatilidad del ARN apoya dicha hipótesis: almacena información y se replica como el ADN, pero, a diferencia de éste, puede coordinar directamente la síntesis de proteínas y comportarse incluso como una enzima [véase "Función enzimática del ARN", por Thomas R. Cech; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987].

Si en algún momento de la historia de la vida el ARN cedió su privilegiado papel al ADN, tuvo que existir un mecanismo de transferencia de información del ARN al ADN. La retrotranscripción pudo brindar ese mecanismo. El proceso que se juzgó otrora proeza esotérica de un grupúsculo de virus, ayuda hoy a los biólogos a trazar los caminos evolutivos que han llevado a las formas de vida dominadas por el ADN.



7. MODELO DE TRANSPOSICION DEL GEN DE LA GLOBINA, que explica la existencia de versiones anómalas de los genes que determinan la síntesis de globina. En ratones, los genes "globínicos" (pseudogenes) no pueden expresarse por carecer de promotores (*azul*). Tampoco poseen intrones (*violeta*) y se encuentran en cromosomas distintos. En circunstancias normales, los verdaderos genes de las globinas (*1*) se transcriben en ARN (*2*), durante la maduración se eliminan los intrones y se le añade una "cola" con muchas bases de adenina (*3*). El modelo de transposición explica la aparición de genes de globina anómalos, pues postula que el ARN maduro se retrotranscribe (*4*) y el ADN que resulta se integra aleatoriamente en el genoma del ratón (*5*). Confirma el modelo el que los genes globínicos posean una cola de adeninas y timinas (*A*, *T*).

Ciencia y sociedad

Ojos eléctricos

La microelectrónica está transformando las herramientas de la astronomía óptica en todas sus escalas. El control por ordenador permite construir y manejar telescopios cada vez mayores. El empleo de semiconductores sensibles a la luz asegura, por su parte, una progresiva reducción en el número de los fotones que se desaprovecha. Con esos equipos, los astrónomos podrán atisbar objetos situados a tal distancia que la tenue luz que llega hasta la Tierra partió de ellos cuando el universo no había alcanzado aún la mitad de su edad actual. Podrán también obtener el espectro óptico de estrellas pertenecientes a galaxias próximas, penetrar en las nubes de gas y de polvo que ocultan los núcleos galácticos e incluso observar los planetas que orbitan en torno a estrellas cercanas.

A lo largo de la última década, se ha abandonado la película fotográfica como medio habitual de registro de imágenes de objetos astronómicos en favor de los dispositivos de carga acoplada (o CCD), que son detectores lumínicos semiconductores. Mucho más sensibles que la más rápida de las películas, los CCD detectan hasta el 70 por ciento de los fotones que les llegan, porque acumulan los electrones generados en las colisiones. Aunque sólo responden todavía a un reducido margen de longitudes de onda, se espera que el empleo de recubrimientos fluorescentes amplíe la sensibilidad a otras longitudes, transformando la radiación incidente en frecuencias que puedan captar los CCD. El incremento del número de elementos de generación de imágenes dispuestos en los aparatos ensancharán su campo de visión; son muchos los astrónomos que aguardan con gran interés un nuevo CCD formado por más de cuatro millones de elementos de imagen que está fabricando Tektronix, Inc., cuya aparición parecen haber retrasado misteriosos problemas de desarrollo.

Además, las nuevas técnicas acelerarán el análisis de la luz emitida por los objetos distantes. La captación de luz en cantidad suficiente para someterla a espectroscopía obliga hoy a prolongar las observaciones durante horas, mientras que los nuevos sistemas, en los que se automatizan ciertas partes del proceso, captan a la vez el espectro de muchos objetos distintos. En un montaje, mediante fibras ópticas se manda al espectrógrafo la luz de 50 o más objetos situados en el campo de visión del telescopio. Los nuevos sistemas de fibra óptica, por ejemplo el que ha desarrollado John Hill en el Observatorio Lick, emplean un robot para situar las fibras en posición correcta en el plano focal del telescopio.

También está incrementándose la potencia de los telescopios. Puede mejorarse la capacidad de captación de luz del aparato aumentando el tamaño del espejo principal, pero sin que por ello se resienta la calidad óptica: la precisión de la forma de la superficie debe aproximarse entonces a la millonésima de centímetro. La presunta mediocridad de las imágenes que produce el mayor telescopio óptico del mundo, un aparato de seis metros instalado en las montañas del Cáucaso, en la Unión Soviética, se debería a las limitaciones del espejo.

Para conseguir esas tolerancias en superficies de ocho metros de diámetro –el tamaño previsto para varios telescopios en estudio– se exigen técnicas reservadas a los ordenadores de gran velocidad. Para evitar el pandeo, los espejos de ese tamaño deben ser muy gruesos, cuyo peso implica, a su vez, instalar rodamientos muy grandes y caros. El telescopio W. M. Keck que están construyendo en Mauna Kea, Hawai, la Universidad de California y el Instituto de Tecnología de California, eludirá el problema sirviéndose de 36 espejos hexagonales de 1,8 metros, que configurarán el equivalente a un solo espejo de 10 metros. Mediante "ópticas activas" controladas por ordenador, los espejos operarán concertadamente: se ajustarán sus soportes en incrementos de millonésimas de centímetro para compensar las modificaciones de los esfuerzos gravitatorios que induzca el movimiento del telescopio.

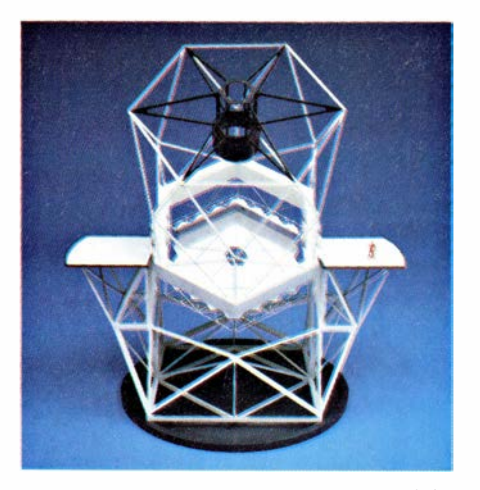
Los espejos deben definir, en conjunto, una superficie paraboloide; durante el pulido, los segmentos del cristal se someten a tensión para que, al liberarlos, las superficies esféricas adopten espontáneamente la configuración deseada. Pero el camino no ha sido fácil: el tallado de los segmentos en unidades hexagonales provoca distorsiones y los ensayos se han retrasado más de lo previsto en primera instancia. Jerry E. Nelson, científico que participa en el proyecto, sigue confiando en que el problema se resuelva aplicando pulidos correctores y espera que el telescopio Keck vea "la primera luz" en 1990, según lo programado.

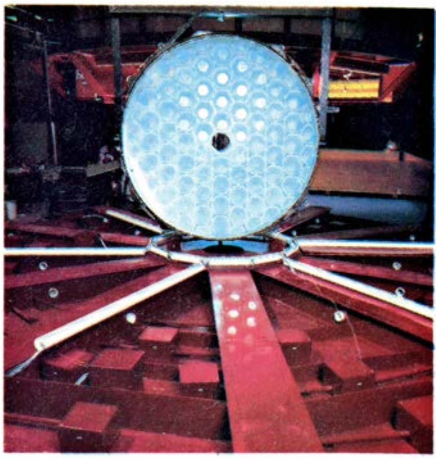
J. Roger P. Angel, de la Universidad de Arizona, está desarrollando un nuevo procedimiento de fabricación de espejos; saca partido de una afortunada coincidencia: la superficie de los líquidos sometidos a rotación adopta la forma de una paraboloide. En un horno giratorio moldea espejos livianos a los que se les confiere una estructura interna en panal de abeja. La técnica quizá permita reducir a unas pocas semanas el tiempo empleado en el tallado de los elementos especulares a partir de una superficie plana, que hoy dura años. Puesto que la curvatura varía a lo largo de las superficies paraboloides, Angel pretende perfeccionar un "buril" que, movido por un ordenador, cambiaría de forma a medida que avanzara por el espejo.

Los espejos moldeados por rotación pueden alcanzar mayores profundidades que los convencionales; gracias a la reducción de la longitud focal, ello debería permitir la obtención de telescopios más cortos y livianos y, por consiguiente, más baratos. Angel ha logrado ya moldear un espejo de 1,8 metros y confía en extrapolar la técnica a la obtención del espejo de ocho metros del telescopio Magallanes, que, financiado por diversas instituciones, está previsto construir en Chile.

También se incorporarían espejos primarios moldeados por rotación al proyecto Colón, que levantaría en Arizona un consorcio de universidades, así como al Telescopio Nacional estadounidense de Nueva Tecnología (NNTT), la gran ilusión de Jacques M. Beckers, de los Observatorios Nacionales de Astronomía Optica. El NNTT constaría de cuatro espejos de ocho metros dispuestos en cuadrado en un mismo armazón; podría dirigirse la luz de todos ellos hacia un solo foco, lo que conferiría al telescopio la capacidad de captación lumínica de un instrumento de 16 metros y la resolución de los de 12.

En el Observatorio Europeo Meridional, que, de aprobarse, se construiría en Chile, se ha adoptado una táctica distinta. Dotado de cuatro telescopios de ocho metros, puestos en línea, constituiría el mayor ingenio óptico del mundo. Sus elementos se conectarían por medio de técnicas de interferometría óptica, lo que conferiría al conjunto la capacidad de captación lumínica de los instrumentos de 16 metros, cuando menos para las observaciones en la banda del infrarrojo, de mayor tolerancia. Los telescopios podrían también emplearse independientemente. Los espejos primarios se apoyarían, cada uno, en unos 150 mecanismos electrónicos, que les ajustarían la forma varias veces por segundo para compensar la presión eólica y las tensiones impuestas por la gravedad.





1. TELESCOPIO W. M. KECK, del que se muestra a la izquierda una maqueta y que poseerá un espejo compuesto por segmentos hexagonales. A la derecha, en un horno de la Universidad de Arizona se moldea un espejo por la técnica de rotación

Biotecnología del caballo

Las pruebas ecuestres de saltos, en las que brillaron antaño los jinetes europeos, han pasado a ser dominio de los norteamericanos. Y, así, en 1984 el equipo estadounidense ganó la medalla de oro en la prueba olímpica de esa especialidad. Sin embargo, los ejemplares que montan los nuevos laureados proceden aún del Viejo Continente, producto de siglos de cuidadosa selección.

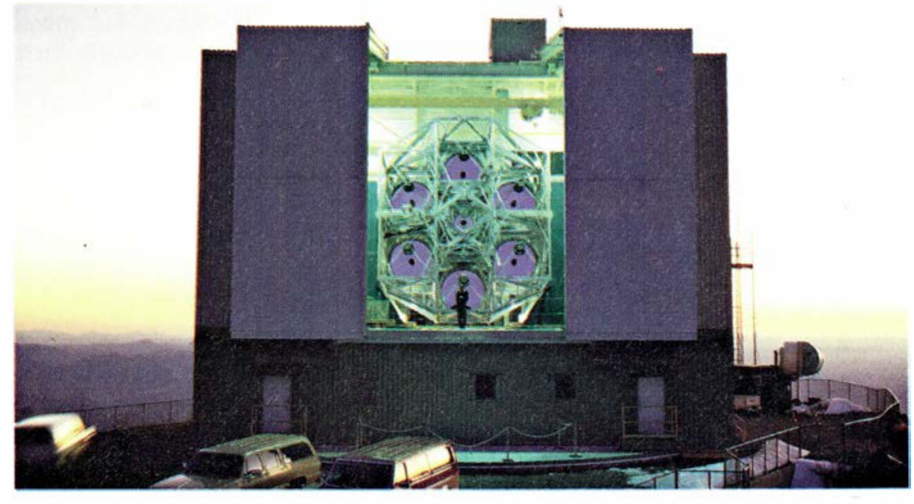
Los criadores norteamericanos han decidido ahora acudir a la biotecnología para ponerle pronto remedio a la situación. Se trata de reducir notablemente el período de ensayo y error que requiere el desarrollo de una nueva raza de "saltadores autóctonos", para lo cual piensan transferir a otras madres de alquiler los embriones concebidos por yeguas campeonas; la productividad de las madres donantes aumentaría hasta un rendimiento de 15 o más potrillos al año.

La Universidad estatal de Colorado va a la cabeza en las investigaciones tendentes a mejorar la cabaña. B. W. Pickett, director del programa sobre equinos que desarrolla la universidad, señala que, si bien los ganaderos vienen sirviéndose de la biotecnología desde hace décadas, en el mundo de la cría caballar, más conservador, se acaban de introducir esas técnicas hace escasos años.

Según Pickett, una de las razones principales de que ello sea así débese a que, en los Estados Unidos, la prueba ecuestre por excelencia han sido siempre las carreras, y las organizaciones que supervisan las razas de competición prohíben, o limitan rigurosamente, el uso de técnicas de reproducción incluso tan extendidas en otros ámbitos como la inseminación artificial. Por el contrario, para participar en concursos internacionales de salto no se exige que los caballos sean de ninguna raza en particular. La creciente popularidad que están alcanzando esas pruebas y el monto de los premios en disputa han conmocionado a los ganadores, y a sus descendientes.

Para la transferencia embrionaria, los especialistas de la Universidad de Colorado inseminan artificialmente una yegua y, una semana después, bañan el útero con solución salina. Si se ha producido la concepción, la solución arrastrará consigo un embrión, de un milímetro de diámetro, más o menos, formado por entre 60 y 90 células, encastadas en la membrana externa del huevo, o cigoto. Localizado el embrión con ayuda del microscopio, se transfiere al útero de la yegua aceptora, practicando una incisión por un costado o a través del canal de parto. La madre donante puede concebir otro embrión o volver a las competiciones sin más demora.

Según Edward L. Squires, que supervisa el programa de cría caballar, durante los últimos cinco años la implantación de embriones en la estatal de Colorado ha producido unos 150 potros, obtenidos de las yeguadas de media docena de ganaderos. Muchos potros son cruces de ejemplares europeos de sangre caliente, bastante robustos, que sobresalen en el salto, con razas norteamericanas muy veloces y de gran espíritu competitivo; la mezcla, según



2. TELESCOPIO DE ESPEJOS MULTIPLES a cargo de la Institución Smithsoniana y la Universidad de Arizona; constituye el primer gran telescopio que emplea varios espejos primarios y se sirve de óptica activa





*3. EMBRION DE UNA SEMANA obtenido de una yegua inseminada artificialmente. Se escinde en dos con ayuda de una pipeta de succión (***arriba***); seguidamente se implantan las dos mitades en madres adoptivas. Mediante esa técnica de transferencia de embriones se obtuvieron hace tres años en la Universidad estatal de Colorado los gemelos genéticamente idénticos Question (***que aparece con la nariz quemada por el sol***) y Answer*

Squires, resultará especialmente prometedora.

Antes de transferir el embrión, puede escindirse para incrementar la producción de la yegua. Se toma del embrión parte del material celular y se coloca en la cubierta hueca de otro huevo; se implantan las dos porciones en madres distintas y así se obtienen dos potros a partir de un mismo embrión. La técnica se encuentra aún en fase de experimentación, pero ya destaca una de sus potenciales virtudes: los potros genéticamente idénticos que logra la técnica permitirían a los ganaderos valorar con gran precisión los efectos de la aplicación de diversos programas de nutrición y entrenamiento.

Bactericidas

El descubrimiento de los antibióticos permitió la consecución de importantes avances en la práctica clínica, pero no brindó la panacea de todas las afecciones de origen bacteriano. Ante ciertos tipos de bacterias, los antibióticos se demuestran ineficaces. Más aún, algunas cepas han desarrollado resistencia a los principales antibióticos. Según informa en *Nature* un grupo sueco de investigación, la respuesta a ambos problemas podría proceder de la confección a medida de fármacos dotados de efectos bactericidas específicos.

Dirigido por Stephen M. Hammond, de Astra Alab, el equipo ha elegido como objetivo las bacterias gramnegativas, entre las cuales se cuentan los gonococos, que causan la gonococia, meningococos, causantes de la meningitis, y diversas formas de salmonella. Sus trabajos se han centrado en la síntesis de la membrana que encierra a la bacteria. Uno de los componentes principales de la envoltura de las gramnegativas es la molécula denominada KDO. Hammond y sus colegas han descubierto que un análogo de ese producto, el NHdKDO, interrumpe la síntesis de la membrana, y ello, según parece, porque el análogo se parece tanto a KDO que lo confunden las enzimas sintéticas; pero carece de la estructura requerida para que progrese el crecimiento de la membrana y éste se interrumpe.

Persistía, sin embargo, un problema: NHdKDO no penetraba en las bacterias intactas. La solución ha consistido en ensamblar el análogo a un par de aminoácidos, que se incorporan por obra de los sistemas de transporte celular. La estrategia se ha demostrado eficaz; la combinación de NHdKDO y aminoácidos constituye "un potente bactericida" de organismos gramnegativos, según escriben los autores. Puesto que las células humanas carecen de KDO, opinan también que el nuevo medicamento resultará tóxico para las bacterias pero bastante seguro para los tejidos humanos.

Los trabajos efectuados por el equipo sueco constituyen sólo el primer paso en esa nueva estrategia, pero las implicaciones del diseño a medida de fármacos podrían ser múltiples. En un comentario que aparece en esa misma edición de *Nature*, Chris Higgins, de la Universidad de Dundee, opina que, dada la ubicuidad del sistema de transporte de que se aprovecha la nueva droga, aparecen "posibilidades sin límite en el diseño de herbicidas y de drogas quimioterapéuticas". Más aún, el par de aminoácidos al que se enlaza NHdKDO lo transportan en las bacterias dos sistemas distintos; y así, para bloquear la entrada del compuesto, habrían de producirse dos mutaciones a la vez, lo cual reduce la probabilidad de que se adquiera a corto plazo resistencia contra el nuevo agente a la lucha antibacteriana.

Electruros

En esta clase de materiales cristalinos, los electrones capturados ocupan el lugar de los átomos de carga negativa. Los electrones, al interaccionar de forma compleja, crean propiedades ópticas y electrónicas singulares

James L. Dye

Uno de los tipos de cristal más simples y mejor conocidos es la sal iónica, de la que un ejemplo típico es el cloruro de sodio o sal común. Los componentes fundamentales de una sal iónica son los iones: átomos o moléculas que se han cargado eléctricamente ganando o perdiendo uno o más electrones. Por ejemplo, para formar cloruro sódico, los átomos de sodio pierden un electrón (con lo cual quedan cargados positivamente) y los átomos de cloro ganan un electrón (y así quedan cargados negativamente). Los iones se atraen entre sí en virtud de sus cargas opuestas y se agrupan en forma compacta y con regularidad cristalina, como lo harían unas esferas empaquetadas estrechamente.

El autor y sus colegas de la Universidad estatal de Michigan han introducido una variación en esta estructura simple, y al hacerlo han creado una nueva clase de materia cristalina. En nuestros cristales, que denominamos electruros, los aniones (iones negativos) han sido reemplazados por electrones. Los electrones están atrapados en las cavidades existentes en el interior de una red de cationes (iones positivos) ordenados con regularidad. Es fácil atrapar electrones en las imperfecciones de los sólidos iónicos ordinarios, pero los electruros son el primer ejemplo de sal iónica en la que todos los lugares aniónicos están únicamente ocupados por electrones.

En cierto sentido, los electrones pueden considerarse los aniones más simples posibles. Sin embargo, a diferencia de los aniones ordinarios, los electrones no se comportan como si de simples esferas cargadas se tratara. En particular, a causa de su pequeña masa y de su tendencia mecánico-cuántica a interaccionar entre sí a grandes distancias, los electrones no pueden fijarse en cualquier posición como los aniones ordinarios. No puede esperarse que un electrón atrapado permanezca constantemente en el interior de la cavidad; en lugar de ello, el electrón se moverá por las proximidades de dicha cavidad, entre los átomos que la rodean, interaccionará con los electrones de las cavidades cercanas e intercambiará posiblemente su posición con la de ellos. Por esta razón, los electruros poseen algunas propiedades ópticas, electrónicas y magnéticas singulares.

Las propiedades de un electruro dependen sobre todo de la distancia entre las cavidades que contienen electrones atrapados y la naturaleza de los canales que conectan a las diferentes cavidades. Cuando los electrones atrapados están bastante alejados entre sí, no interaccionan fuertemente y, en consecuencia, se comportan como un conjunto periódico de cargas negativas aisladas. Cuando los electrones están muy juntos, empiezan a mostrar las propiedades mecánico-cuánticas pronosticadas para conjuntos muy grandes de partículas idénticas. Cuando están todavía más cerca, las propiedades de conjunto resultan predominantes y los electrones se "deslocalizan", es decir, dejan de estar confinados en el interior de las cavidades individuales y quedan más o menos libres para moverse a través de la red de iones positivos.

Los electruros nos ofrecen, pues, una oportunidad fascinante para estudiar las interacciones entre electrones en los sólidos. Sintetizando electruros de diferentes materiales, se puede variar la geometría de las cavidades aniónicas y su relación con los cationes que las rodean. Las propiedades resultantes pueden conseguir que los electruros lleguen a ser la base de nuevos materiales y dispositivos de utilidad práctica.

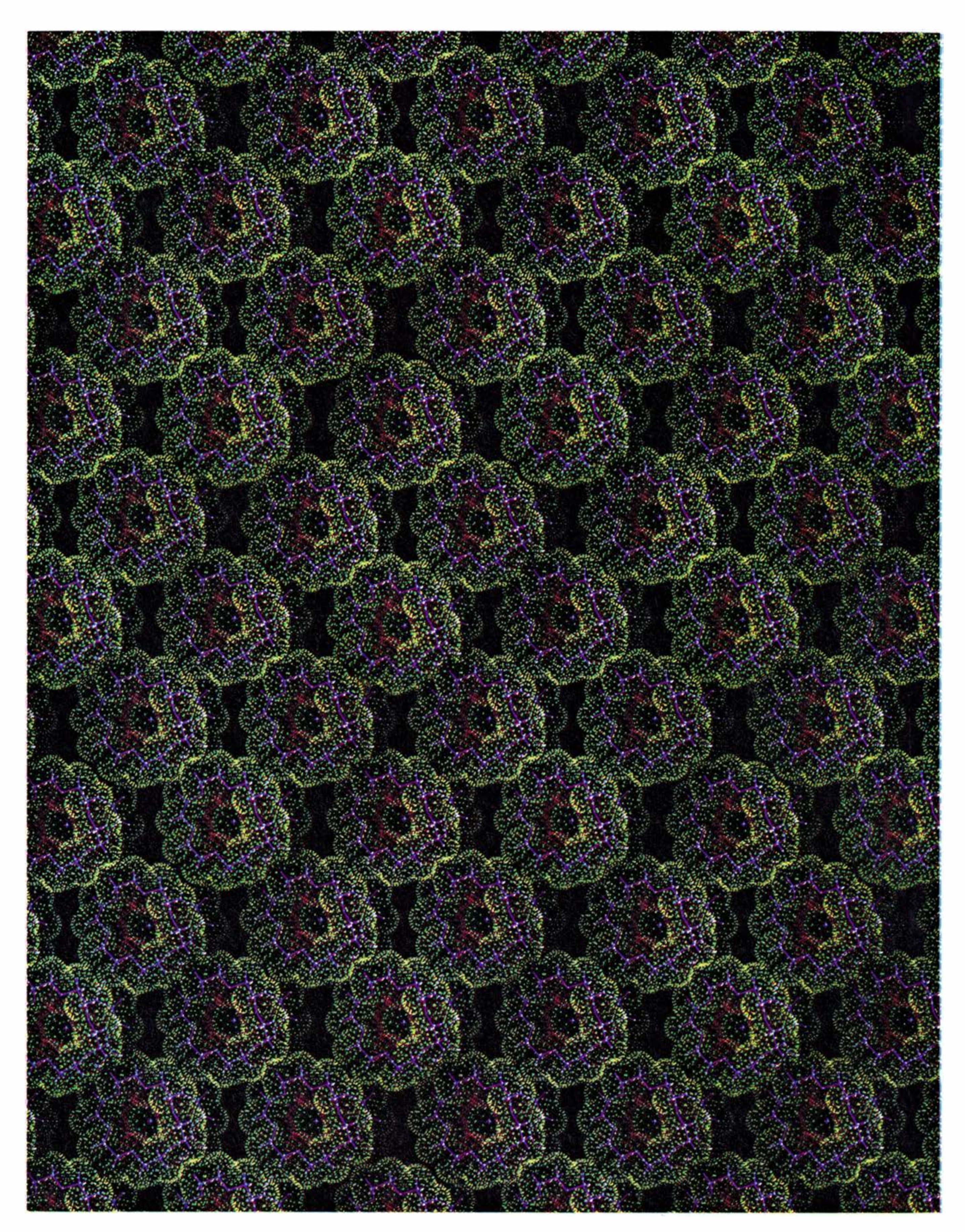
Materiales afines: los alcaluros

Nuestras investigaciones sobre los electruros tuvieron lugar como consecuencia directa de otros trabajos previos que habíamos realizado para crear unos nuevos cristales que denominamos alcaluros. Los alcaluros tienen una estructura muy similar a la de los electruros. Están basados en los metales alcalinos: litio, sodio, potasio, rubidio, cesio y francio (Li, Na, K, Rb, Cs y Fr, respectivamente). Los átomos de los metales alcalinos tienen una fuerte tendencia a desprenderse de un electrón y formar iones positivos. Encontramos que, en lugar de ellos, y bajo ciertas condiciones, puede lograrse que algunos átomos alcalinos ganen un electrón, formando de ese modo un ion negativo [véase "Aniones de metales alcalinos", de James L. Dye; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1977]. Un alcaluro es una sal iónica en la que tanto los cationes como los aniones provienen de metales alcalinos.

Los alcaluros requieren además un tercer componente. Los aniones de los metales alcalinos son muy reactivos: si, simplemente, se colocaran juntos aniones alcalinos y cationes alcalinos, los aniones donarían electrones a los cationes, con lo cual se neutralizarían los dos iones y se produciría un metal alcalino ordinario. Para evitar tales reacciones, procedimos a encerrar los iones cargados positivamente en el interior de unas jaulas especiales, consistentes en moléculas neutras, poco dispuestas a reaccionar.

Las jaulas utilizadas eran de dos tipos. Uno, conocido con el nombre de éteres de corona, fue desarrollado en 1967, por Charles J. Pedersen, de la empresa E. I. du Pont de Nemours & Company. El otro tipo se denomina criptando y lo desarrollaron, dos años más tarde, Jean-Marie Lehn y sus colaboradores en la Universidad de Estrasburgo.

Como su nombre sugiere, los éteres de corona tienen la forma de este atributo regio, con un anillo de átomos de



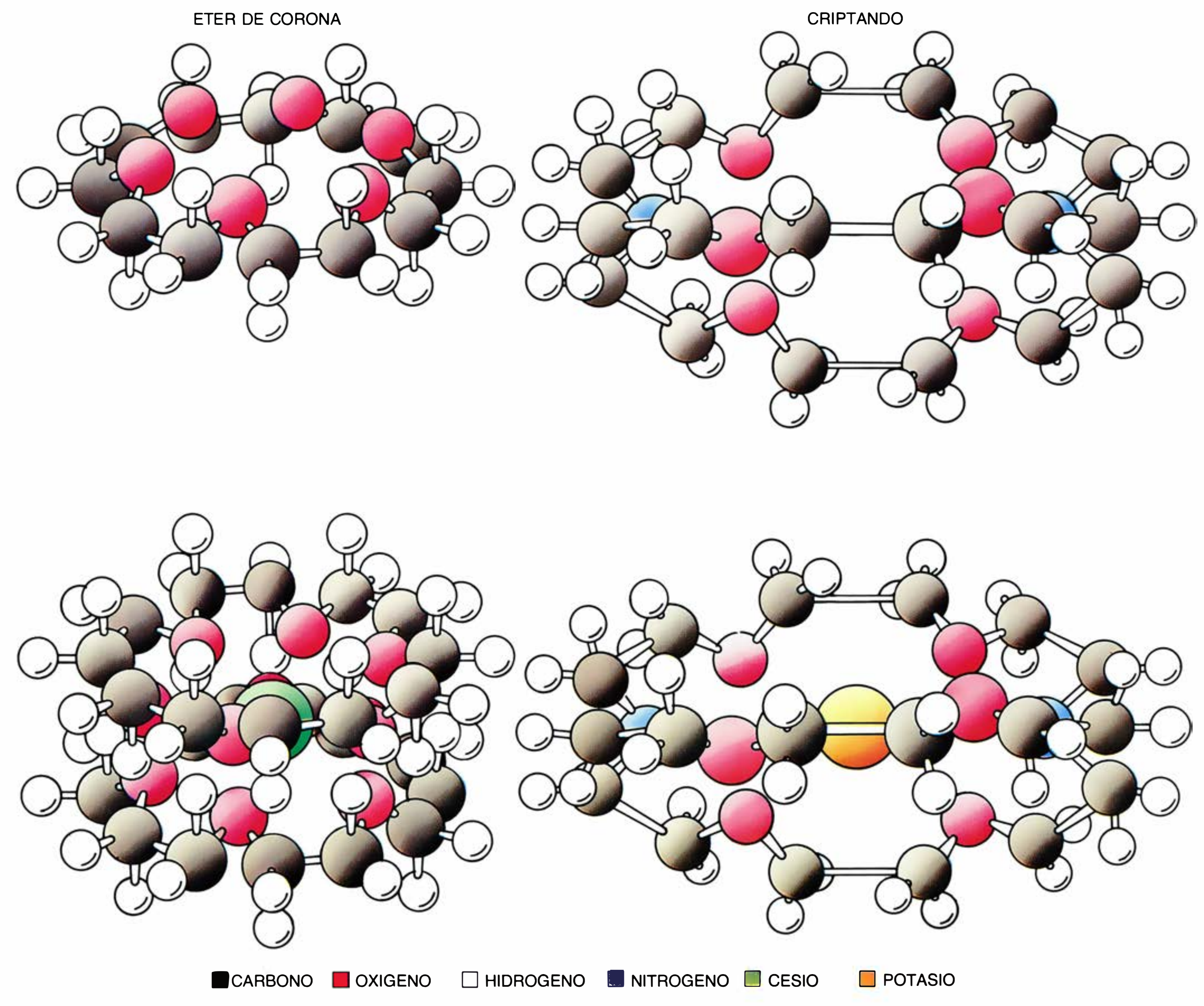
1. ESTRUCTURA CRISTALINA DE UN ELECTRURO. Muestra los rasgos que fundamentan las propiedades peculiares de esta nueva clase de materia cristalina. En esta imagen de ordenador elaborada por James Kilkelly, los puntos definen las superficies de los átomos. Cada grupo redondeado de átomos representa la cara de un "bocadillo" (''sandwich'') de dos estructuras en anillo: los éteres de corona, constituidos por un entramado de átomos de carbono (*esqueleto azul*) unido a átomos de oxígeno (*rojo*) y de hidrógeno (*amarillo*). En el centro de cada bocadillo se aloja un átomo de cesio (*verde*) que ha cedido un electrón y porta, pues, carga positiva. Los espacios que median entre las estructuras son canales que conectan a las cavidades donde se hallan atrapados los electrones.

carbono (cada uno de los cuales está unido a dos átomos de hidrógeno) y unas denticiones constituidas por átomos de oxígeno [*véase la figura 2*]. Un catión alcalino mayor que el agujero del centro del éter de corona puede encerrarse entre dos éteres de corona: el catión puede situarse encima del centro de una corona, rodeado por las denticiones; entonces la segunda corona podría ajustarse sobre la primera, a modo de sombrero. Las dos coronas entrelazadas forman un cilindro compacto, con el catión en su centro y los anillos de las coronas en ambos extremos.

Los criptandos se asemejan a una cripta o bóveda; de ahí su nombre. Una molécula de criptando consta de dos átomos de nitrógeno conectados por tres filamentos largos y curvados constituidos por carbono, hidrógeno y oxígeno. Los filamentos actúan como los barrotes de una jaula: un catión alcalino puede quedar atrapado en el interior de la misma, donde estará protegido de forma efectiva de cualquier anión existente en su entorno.

Los complejos que se forman cuando las moléculas de éter de corona o de criptando (conocidas generalmente con el nombre de complejantes) encierran iones alcalinos cargados positivamente son las bases estructurales de los alcaluros y de los electruros. Un ejemplo típico es el alcaluro constituido por un catión de cesio, dos éteres de corona del tipo denominado 18-corona-6 (porque cada uno de ellos tiene una estructura de anillo que consta de 18 átomos, seis de los cuales son átomos de oxígeno) y un anión de sodio (un átomo de sodio dotado de carga negativa). Los éteres de corona emparedan a los iones de cesio para formar cilindros cuyo diámetro es del orden de 10 angstrom y cuya altura es unos ocho angstrom (un angstrom equivale a 10^{-8} centímetros, es decir, una longitud aproximadamente igual al radio de un átomo de hidrógeno). Los cilindros se empaquetan de forma muy apretada y llenan la mayor parte del espacio disponible. Las cavidades dejadas por los aniones tienen la forma de un balón de fútbol deshinchado; vienen a medir 4,5 por 4,5 por 7,0 angstrom. Cada catión combinado está rodeado por ocho aniones que definen aproximadamente los vértices de un cubo distorsionado; por su parte, cada anión está rodeado por ocho cationes combinados (o "complejados").

Entre los cristales de color dorado de las primeras hornadas de alcaluros cristalinos que sintetizamos, encontramos algunos sólidos de color azul oscuro. Estos cuerpos distinguíanse de los alcaluros no sólo por el color, sino también por sus propiedades magnéticas



2. MOLECULAS COMPLEJANTES de los electruros. Sirven para encerrar a los cationes (átomos cargados positivamente), impidiendo su recombinación con los elecrones. Un éter de corona (*arriba, a la izquierda*) es un anillo de átomos de carbono e hidrógeno con unas denticiones de átomos de oxígeno. Dos coronas envuelven a un catión en un bocadillo cilíndrico (*abajo a la izquierda*). Los criptandos (*arriba a la derecha*) tienen forma de jaula con tres barras: cadenas de átomos de carbono, oxígeno e hidrógeno que unen a dos átomos de nitrógeno. Un catión puede ajustarse limpiamente en esta jaula (*abajo, a la derecha*).

poco habituales. Estas nos hicieron sospechar que dichos sólidos eran una sal similar a los alcaluros que contenía electrones atrapados (cedidos por los átomos de metal al formar cationes), en lugar de los aniones del metal alcalino. En otras palabras, sospechamos que habíamos sintetizado accidentalmente electruros.

Síntesis de electruros

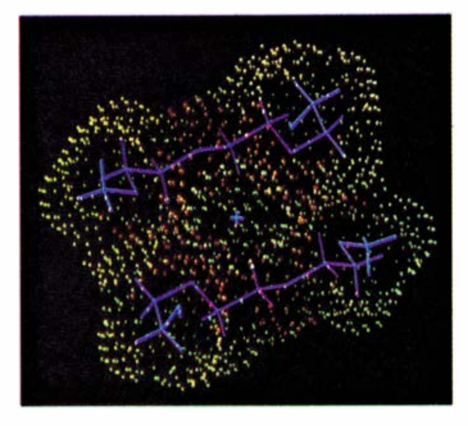
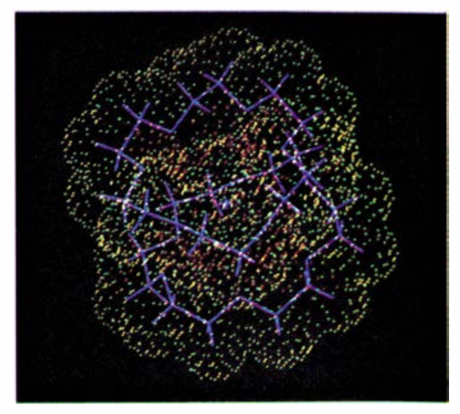
Este resultado nos llevó a tratar de sintetizar deliberadamente electruros. Por desgracia, el desarrollo de las técnicas necesarias para que los sólidos se puedan identificar sin ambigüedades como electruros resulta muy difícil. El problema principal es que los electrones atrapados están químicamente "calientes" y, por tanto, resulta difícil impedir que los electruros se autodestruyan: los electrones tienden a reaccionar con las moléculas complejantes o con los disolventes, donde los complejantes y el metal alcalino están disueltos, descomponiéndolos.

Las reacciones de descomposición son reacciones en cadena (es decir, los productos de cada reacción sirven para inducir una o más reacciones de descomposición posteriores) y, por tanto, se producen muy rápidamente, una vez se han iniciado. Como consecuencia, para sintetizar electruros se debe ser particularmente cuidadoso en la purificación y manejo de disolventes, complejantes y metales alcalinos. Una complicación adicional reside en que todos los procesos de síntesis y almacenamiento de electruros deben realizarse a temperaturas muy bajas, dado que la velocidad de descomposición aumenta con la temperatura.

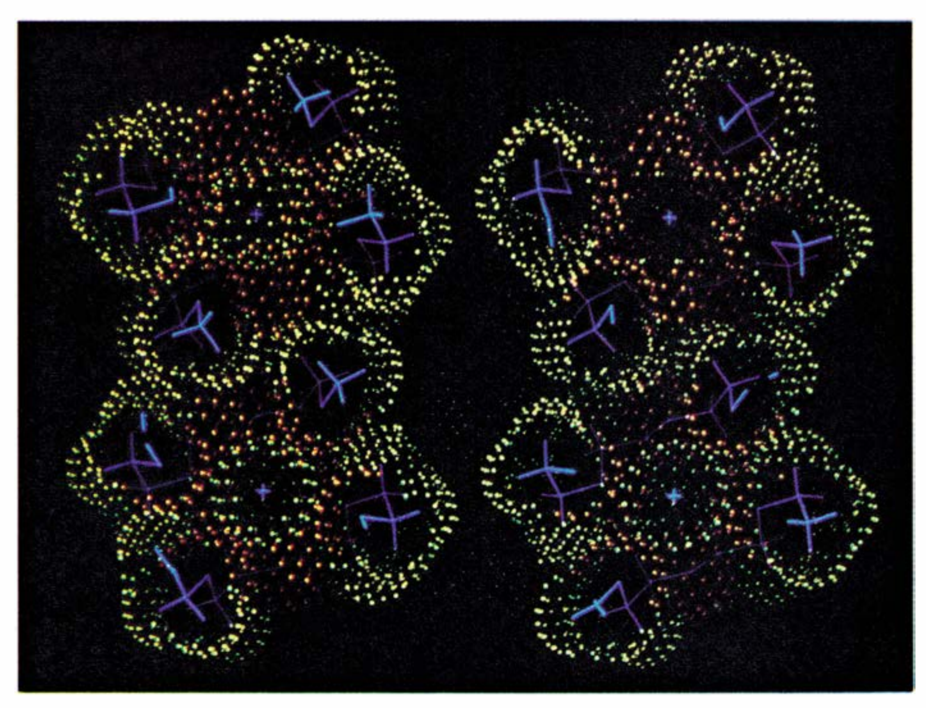
Aun así, los primeros electruros producidos deliberadamente se prepararon de una forma relativamente simple. Cuando los metales alcalinos están disueltos en ciertos disolventes, tienden a liberar un electrón dentro de la disolución, con lo cual quedan cargados positivamente. Las moléculas complejantes disueltas recubren espontáneamente estos cationes alcalinos. Por este motivo, procedimos a disolver juntas unas cantidades adecuadas de metal y complejantes, y luego evaporamos el disolvente. El resultado fue un polvo fino o, en algunas ocasiones, una película delgada de electruros. Analizando estos productos, pudimos aprender bastantes cosas sobre la naturaleza de los electruros. A pesar de todo, los productos preparados mediante este método contenían frecuentemente varios contaminantes: otras clases de compuestos (tales como los alcaluros), metales o complejantes sobrantes y productos químicos producidos en la descomposición del disolvente o del complejante.

Un segundo método de fabricación, conocido con el nombre de deposición de vapor, permite obtener unas películas delgadas de electruros de espesor y composición controlables. En este procedimiento, el complejante y el metal alcalino están colocados en recipientes separados bajo alto vacío. Variando las temperaturas de los contenedores, se puede evaporar el metal y el complejante y depositarlos simultáneamente sobre una superficie de cuarzo con velocidad regulable. Una reacción de estado sólido entre el complejante y el metal produce la película de electruro. Este procedimiento permite estudiar las propiedades ópticas y eléctricas de las películas delgadas de electruro, pero no es capaz de producir grandes cantidades de electruros cristalinos, dado que el espesor de las películas depositadas crece tan sólo a razón de unos pocos angstrom por segundo.

Un tercer método de preparación de electruros, quizás el mejor de todos ellos, se conoce como cristalización directa. El metal y las moléculas complejantes se colocan en brazos separados de una vasija de reacción especial [*véase la figura 2*]. Dentro del brazo que contiene el complejante se introduce un disolvente y luego se inclina el aparato hasta que el complejante disuelto se vierte sobre el metal. El metal se disuelve a medida que las moléculas del éter de corona o del criptando forman

3. EL "BOCADILLO" DE ETER DE CORONA consta de dos éteres de corona que encierran un ion de cesio. Se representan en estas figuras desde dos ángulos diferentes. La de la izquierda corresponde a una sección transversal del centro de los éteres de corona y muestra la situación del ion en el bocadillo. La figura de la derecha muestra la forma del bocadillo en su conjunto, tal como se vería en una vista de tres cuartos.



4. UNA FORMACION FUERTEMENTE EMPAQUETADA de bocadillos de éter de corona define una cavidad en la que puede atraparse un electrón. Los canales que conectan esta cavidad con otras se encuentran situados arriba y abajo de la imagen. Esta ilustración es aproximadamente perpendicular a la figura 1.

complejos con los cationes del metal. A continuación, se evapora una gran parte del disolvente y se añade un codisolvente más débil. Seguidamente, se enfría la disolución. Si la mezcla de disolventes tiene la composición adecuada, los cristales se forman espontáneamente en la disolución que se está enfriando. Utilizando esta técnica, hemos podido obtener en algunos casos cristales relativamente grandes (con tamaños del orden de un milímetro). Después de quitar el disolvente, las muestras cristalinas se colocan dentro de unos tubos de cristal; finalmente, estos tubos se cierran al calor y se almacenan a unos −80 grados Celsius hasta su utilización. Durante toda la operación, la temperatura de las muestras no debe exceder nunca los −20 grados.

Propiedades ópticas

Los electruros producidos por el primero y el tercero de estos métodos se presentan normalmente en forma de polvo fino de color azul oscuro o en forma de cristales negros brillantes. Las películas delgadas de electruros producidos por los métodos primero o segundo presentan un color azul al ser atravesados por la luz: las películas absorben la luz en las regiones del espectro rojo e infrarrojo.

La información sobre la absorción óptica de los electruros puede decirnos muchas cosas sobre las propiedades de los electruros de estos compuestos. Cuando una substancia absorbe un fotón, o cuanto de energía luminosa, la energía del fotón, que depende de su longitud de onda, se transfiere a un electrón de la substancia, que pasa de un estado de energía relativamente bajo a un estado de energía más elevado. De acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica, los electrones presentes en los materiales sólo pueden tener ciertas cantidades discretas de energía. Los niveles de energía permitidos varían de una substancia a otra.

En el caso de los sólidos, los niveles permitidos de energía están agrupados en bandas; cada banda está constituida por un conjunto limitado de estados permitidos de energía. De acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, un mismo estado de energía dentro de una banda determinada sólo puede ser ocupado por dos electrones. En consecuencia, para que un fotón sea absorbido, debe tener exactamente la energía adecuada para pasar a un electrón desde una banda de energía permitida a otra banda que contenga algunos estados no ocupados, o desde un estado dentro de una banda a otro estado de esa misma banda que no esté completamente ocupado.

Por tanto, la longitud de onda de la luz que una substancia puede absorber indica las diferencias de energía existentes entre los estados energéticos electrónicos que hay disponibles en esa substancia. A su vez, las diferencias de energía indican cuán fuertemente ligados están los electrones a los átomos de la substancia en cuestión o, en el caso de los electruros, cuán intensas son las fuerzas que retienen a los electrones dentro de las cavidades. Cuanto más fuertemente ligado esté un electrón, tanto mayor será la cantidad de energía que debe absorber para liberarse.

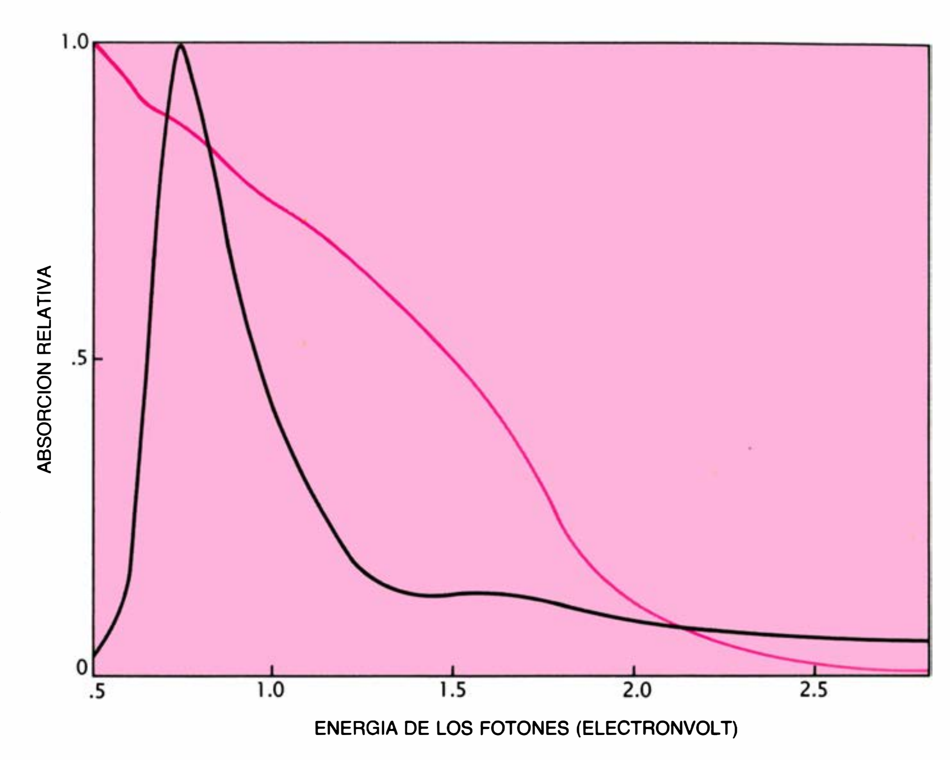
Desde el punto de vista de sus espectros ópticos, los electruros pueden clasificarse en dos grandes grupos: aquellos en los que los electrones que actúan como aniones están localizados dentro de las cavidades formadas entre los cationes complejados y aquellos en los que los electrones están deslocalizados o libres para moverse a través del cristal (no obstante, es también posible

5. PELICULA DELGADA DE ELECTRURO que recubre el interior de un frasco: adquiere una coloración azulada cuando la luz la atraviesa; este electruro absorbe la luz roja e infrarroja. La absorción óptica de un electruro proporciona las claves de cuán fuertemente están ligados los electrones atrapados y en qué medida interaccionan entre sí. El electruro de esta fotografía está hecho de metal de cesio y moléculas de éter de corona llamadas 18-corona-6; su estructura se ha mostrado en las imágenes obtenidas por ordenador de las páginas anteriores. Esta fotografía fue obtenida por Mark Kuchenmeister en el laboratorio del autor.

que los electrones de los electruros deslocalizados se hallen débilmente atrapados y no libres).

Deslocalizadores y localizados

Los electrones aniónicos de un electruro deslocalizado recuerdan, muy de cerca, a los electrones de un metal ordinario. En un metal, los electrones de valencia (los más exteriores de cada átomo) se pueden mover libremente a través de toda la red de átomos; gracias a ello, los metales tienden a ser buenos conductores. Estos electrones de conducción se hallan en una banda de energía —la banda de conducción— que está sólo parcialmente llena de electrones. Los electrones de conducción pueden, pues, absorber fotones en una serie continua de longitudes de onda, dado que no existe una distancia mínima entre los estados de energía disponibles dentro de esa banda. Son capaces incluso de absorber fotones cuya energía sea muy pequeña (es decir, fotones con longitudes de onda grandes). Al igual que los metales, los electruros deslocalizados son capaces también de absorber fotones en una serie continua de longitudes de onda, incluyendo longitudes de onda relativamente grandes.



6. ESPECTROS DE ABSORCION OPTICA de dos electruros, donde se pone de manifiesto la existencia de ciertas propiedades electrónicas. El electruro constituido por cesio y 18-corona-6 (*negro*) tiende a absorber fotones (cuantos de luz) que tienen, al menos, una energía del orden de 0,5 electronvolt, pero no absorbe fotones de energías más bajas, lo que indica que estos electrones están fuertemente localizados. Cada electrón está atrapado en una cavidad de la que puede escapar al absorber un fotón de la energía adecuada. El electruro de litio y cierto criptando (*color*) puede absorber fotones de un amplio intervalo de energías, lo que indica que estos electrones se hallan mucho más deslocalizados. En otras palabras, estos electrones se mueven con bastante libertad a través del cristal de electruro y, al absorber un fotón, se mueven con mayor celeridad.

Los electruros localizados —que constituyen la mayoría de los electruros sintetizados hasta ahora— tienen mucho más en común con los semiconductores que con los metales. De la misma forma que los electrones de los electruros localizados están confinados dentro de las cavidades aniónicas, los electrones de los semiconductores están ligados a átomos individuales. Los electrones pueden elevarse a la banda de conducción, a un estado de libertad mayor y energía más alta, cuando absorben un fotón. La diferencia entre la energía del estado ligado y la energía del llamado estado excitado establece un valor mínimo para la energía que un electrón es capaz de absorber. Por este motivo, los semiconductores no absorben luz de baja energía muy fuertemente; sí absorben, en cambio, luz de energía más elevada.

De forma análoga, los electruros localizados no absorben fuertemente fotones cuando sus energías son inferiores a 0,5 electronvolt (lo cual corresponde a luz infrarroja cuya longitud de onda es de unas 2,5 micras), pero absorben luz con longitudes de onda más cortas (es decir, con energías más altas). Todavía no está claro si un fotón con una energía de 0,5 electronvolt eleva un electrón del electruro hasta la banda de conducción, o tan sólo hasta algún estado intermedio débilmente ligado.

¿Son metales algunos electruros?

La observación del espectro de absorción óptica de las películas de electruros plantea la excitante posibilidad de que las propiedades electrónicas de los electruros de composición variable se sitúen entre las propiedades de los metales y las de los semiconductores. ¿Por qué no contestar a esta pregunta midiendo su conductividad eléctrica? Pero un planteamiento tan sencillo presenta varias dificultades.

Ante todo, muchos no metales (incluidos ciertos semiconductores) pueden conducir la electricidad bastante bien. La verdadera prueba de si un material es un metal consiste en determinar si su conductividad aumenta o disminuye al disminuir la temperatura. Los metales se hacen más conductores a temperaturas más bajas. La red atómica vibra menos y los electrones que transportan la corriente sufren menos colisiones con la red de átomos.

Los semiconductores, por el contrario, se vuelven menos conductores cuando la temperatura disminuye. La razón es que los únicos electrones libres para transportar corriente en los semiconductores son aquellos que poseen energía térmica suficiente para pasar del estado ligado a una banda de conducción. Cuando la temperatura disminuye, el número de electrones con energía suficiente para actuar como electrones de conducción disminuye. En consecuencia, para determinar las propiedades electrónicas de un electruro, será necesario estudiar cómo varía su conductividad con la temperatura.

Otra complicación adicional está relacionada con la dificultad de conseguir cristales de electruros de gran tamaño. La mejor manera de medir la conductividad de un material consiste en unir cuatro alambres finos a un cristal. A continuación, se hace pasar una corriente entre dos de los alambres de prueba y se mide la diferencia de voltaje entre los otros dos alambres. Es difícil conseguir cristales de electruro que adquieran tamaño suficiente para llevar a cabo esta comprobación. Por otra parte, la tendencia reactiva y la sensibilidad de los electruros al calor dificulta la manipulación de los cristales. Todos estos problemas han impedido, hasta ahora, medir la conductividad de los cristales de electruros.

A pesar de todo, hemos obtenido in-

formación muy útil sobre esta cuestión midiendo la conductividad del polvo compacto de electruro. La resistencia originada por los límites de los diminutos granos cristalinos altera los resultados de las medidas, pero la dependencia de la conductividad del paquete de polvo con la temperatura no debe variar demasiado de la que corresponde a un cristal simple.

Para llevar a cabo esta medida hemos comprimido una muestra de polvo entre dos electrodos de acero inoxidable que producen una presión del orden de 50 atmósferas. Modificando la temperatura de una corriente de nitrógeno que atraviesa el recipiente que contiene la muestra, podemos determinar cómo varía la conductividad de dicha muestra con la temperatura.

Gracias a esta técnica, hemos encontrado que los electruros cuyas propiedades ópticas se parecen a las de los semiconductores (aquellos en los que los electrones aniónicos están localizados) presentan también el descenso de la conductividad para bajas temperaturas que caracteriza a los materiales semiconductores.

Cuando se intenta medir la conductividad de los electruros cuyo espectro óptico es parecido al de los metales, se presenta una dificultad adicional. Las conductividades de los paquetes de polvo de estos compuestos son inicialmente mucho mayores que las conductividades de los electruros "semiconductores", pero disminuyen rápidamente con el tiempo. Una posible explicación de este hecho se basa en la hipótesis de que las planchas de acero inoxidable actúan como catalizadores para la descomposición de la capa contigua de electruro, creando capas aislantes de productos de descomposición. Por este motivo, no nos ha sido posible demostrar que los electruros "metálicos" son verdaderos metales.

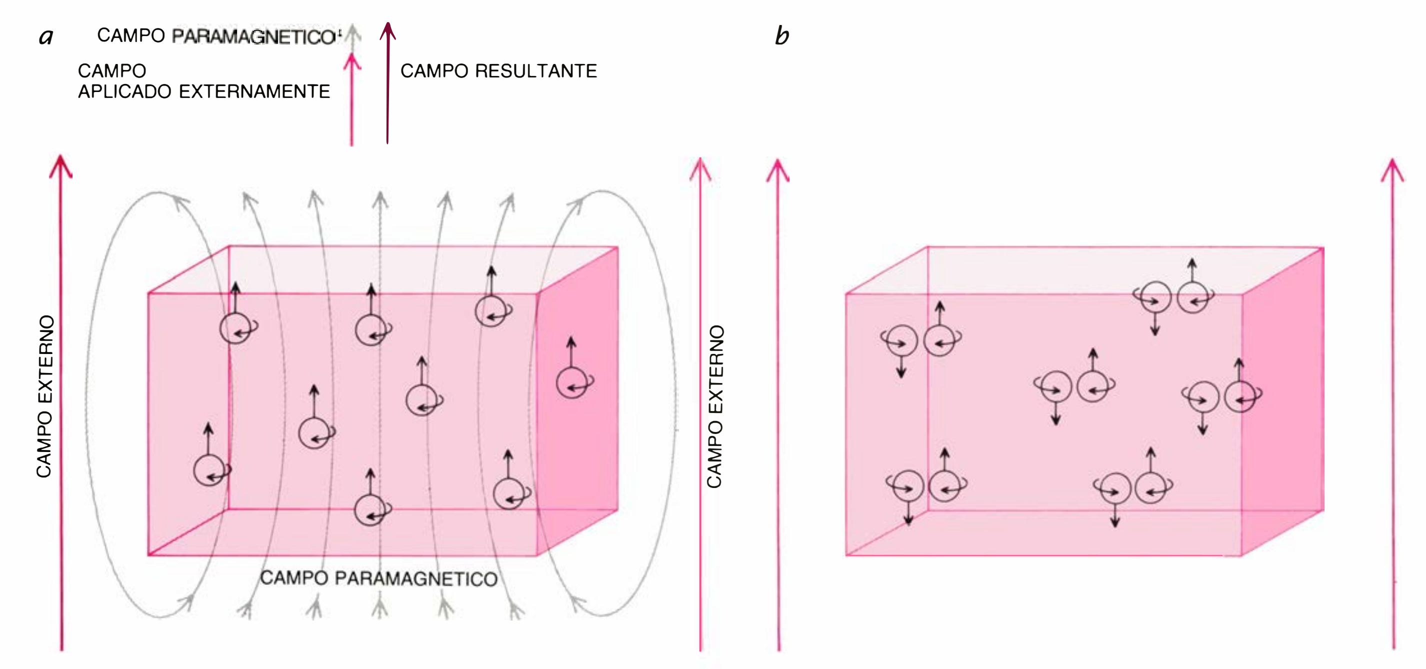
La estructura cristalina de los electruros

¿Por qué están los electrones aniónicos localizados en algunos electruros y desubicados en otros? Creemos que la contestación a esta pregunta hay que buscarla, en parte, en el grado en que los electrones aniónicos interaccionan entre sí; esto último depende, a su vez y en parte también, de la estructura espacial del cristal.

Para comprobar esta hipótesis, se precisaría investigar la estructura física de los diferentes tipos de electruros. Por desgracia, esta tarea tampoco es nada fácil. Una vez más, el problema principal radica en la imposibilidad de producir cristales de electruro de gran tamaño. La mayoría de las técnicas cristalográficas que se utilizan en la determinación de estructuras, tales como la difracción de rayos X, requiere cristales relativamente grandes. Por otra parte, la difracción de rayos X no puede dar ninguna información específica sobre las posiciones de los electrones atrapados; sólo permite determinar las posiciones de los átomos de un cristal. No obstante, a partir de las posiciones de los átomos alcalinos y de los complejantes, sería posible deducir las formas, tamaños y posiciones relativas de las cavidades en las que los electrones pueden estar atrapados.

Un electruro cuya estructura se ha podido determinar con la cristalografía de rayos X está compuesto por cationes de cesio complejados por moléculas de éter de corona 18-corona-6. Esta estructura es muy similar a la del alcaluro constituido por cationes de cesio, complejantes 18-corona-6 e iones de sodio cargados negativamente, que he descrito anteriormente. De nuevo dos éteres de corona encierran a cada ion de cesio y forman un cilindro de unos 10 angstrom de diámetro y ocho angstrom de altura; estos cilindros están empaquetados de forma compacta. Los espacios entre los cilindros definen las cavidades aniónicas, cada una de las cuales está rodeada por ocho cilindros en una red rectangular ligeramente distorsionada.

Este electruro es uno de los que se comporta como semiconductor. Sus propiedades ópticas y su conductividad sugieren que los electrones aniónicos están fuertemente localizados, y su estructura física parece apoyar esta hipótesis. Las cavidades aniónicas quedan bastante separadas y, por tanto, es probable que los electrones atrapados sólo interaccionen débilmente. Cada cavidad está conectada con otras seis mediante los canales existentes entre los complejos catiónicos cilíndricos.



7. PROPIEDADES MAGNETICAS de un material. Dependen, con mucho, de la interacción entre sus electrones. Como sucede con todas las partículas cargadas que giran sobre sí mismas, cada electrón genera un pequeño campo magnético. Los materiales que contienen un gran número de electrones que no interaccionan entre sí (*a*) tienden a ser paramagnéticos: los campos de los distintos electrones tienden a alinearse con cualquier campo impuesto desde el exterior, fortaleciendo el campo magnético resultante en el interior del material. En otros materiales (*b*), los electrones forman pares. Los campos de los dos electrones de

En el caso de otros electruros que no se han analizado por cristalografía de rayos X, existen formas alternativas de estudiar las interacciones entre los electrones aniónicos. Una de estas técnicas consiste en investigar la respuesta del electruro a campos magnéticos para diferentes temperaturas.

Interacciones entre electrones

Las propiedades magnéticas de un sólido se pueden estudiar adecuadamente a partir de electrones individuales o de grupos de electrones existentes en el sólido. Cada electrón origina un pequeño campo magnético, parecido al de un imán. A diferencia de lo que sucede con el campo de un imán, el campo magnético creado por los electrones cumple ciertas reglas de la mecánica cuántica. Por ejemplo, cuando el electrón se sitúa en un campo magnético externo, el campo magnético intrínseco del electrón sólo puede orientarse en la misma dirección del campo externo o en la opuesta. Por otra parte, cuando dos electrones están emparejados en lo que se conoce como un estado mecánico cuántico singlete, sus campos magnéticos deben orientarse en direcciones exactamente opuestas; los enlaces químicos más corrientes consisten en tales pares de electrones.

Cuando un electrón aislado se encuentra en un campo magnético, resulta energéticamente favorable que el campo magnético del electrón esté alineado en la misma dirección que el campo externo. Cuando una muestra de un material determinado contiene un gran número de electrones aislados que no interaccionan entre sí, todos los electrones tenderán a alinearse con cualquier campo magnético externo. Este efecto, conocido como paramagnetismo, aumenta la intensidad del campo magnético resultante en el interior de la muestra.

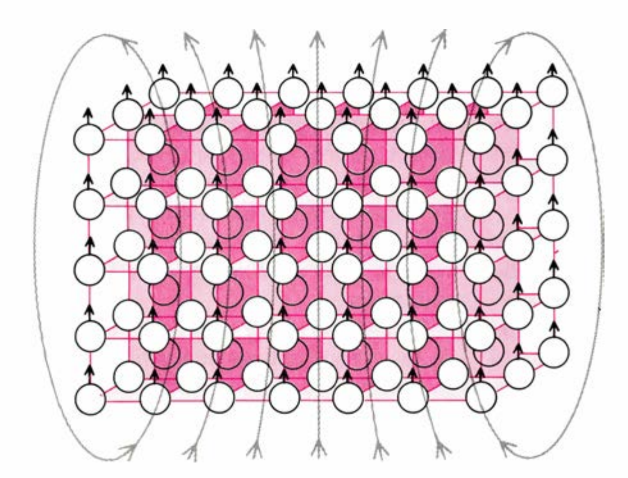
El electruro cuya estructura hemos determinado (es decir, el constituido por cesio y éteres de corona 18-corona-6) se comporta como si sus electrones no interaccionaran en absoluto: es fuertemente paramagnético. Este descubrimiento está de acuerdo con la evidencia previa de que sus electrones están localizados. Algunos otros electruros localizados, tales como uno constituido por rubidio y moléculas de corona llamadas 15-corona-5 (dado que la estructura de anillo incluye un total de 15 átomos, cinco de los cuales son de oxígeno) y otro formado por potasio y moléculas 15-corona-5, son también paramagnéticos. El espectro de absorción óptica, las conductividades eléctricas y las propiedades magnéticas de estos compuestos sugieren que los electrones están localizados en posiciones lo suficientemente alejadas entre sí como para permitir tan sólo interacciones muy débiles entre ellos.

Una variedad interesante está constituida por una mezcla de cesio y de coronas de éter 15-corona-5; de acuerdo con sus propiedades ópticas y eléctricas, este compuesto parece tener electrones localizados. Para temperaturas por encima de los 10 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto), la mezcla es paramagnética, pero cuando muestras cuidadosamente cocidas se enfrían hasta alcanzar una temperatura de 4,3 grados, se presenta un efecto más complicado, conocido con el nombre de antiferromagnetismo. El antiferromagnetismo (al igual que el efecto relacionado con él, conocido como ferromagnetismo) es el resultado de interacciones de largo alcance entre muchos electrones en ciertas redes cristalinas. Cuando un material antiferromagnético se enfría por debajo de cierta temperatura, la mitad de los electrones se alinean espontáneamente con sus campos magnéticos orientados en una dirección y la otra mitad se alinean con sus campos orientados en la dirección opuesta. El campo de un electrón determinado se orienta en la dirección opuesta a la de los campos de sus vecinos más cercanos. (Por el contrario, en un material ferromagnético, los campos de todos los electrones se orientan en una misma dirección.)

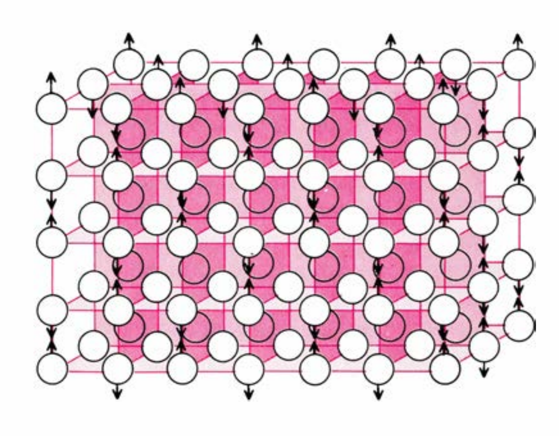
Interacciones de largo alcance

La aparición de este efecto de largo alcance demuestra la existencia de interacciones pequeñas, aunque significativas, entre los electrones aniónicos de este compuesto. El motivo por el que los correspondientes electruros basados en el rubidio y en el potasio no

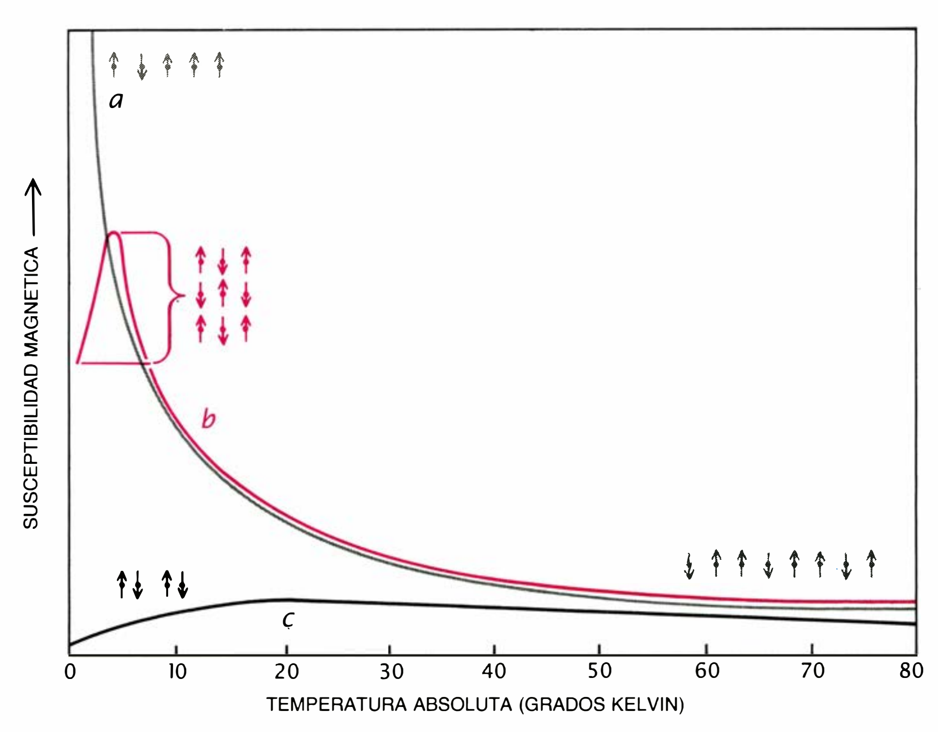
c



d



un par se orientan en sentidos opuestos, anulando mutuamente su efecto sobre el campo magnético resultante en el interior de la muestra. En algunos materiales (*c*), un gran número de electrones interaccionan a grandes distancias, de suerte tal que todos llegan a estar alineados, incluso en ausencia de un campo externo. Se dice que estos materiales son ferromagnéticos. Otra clase de interacción de largo alcance es el antiferromagnetismo (*d*), en el cual los campos de la mitad de los electrones están orientados en un sentido y los campos de la otra mitad se hallan orientados en el sentido contrario de una misma dirección.



8. SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA de los electruros (la cuantía en que un campo magnético externo se refuerza con los campos generados en el interior del electruro). Dicha propiedad proporciona información sobre la interacción de los electrones en los electruros. La susceptibilidad magnética del electruro hecho de cesio y 18-corona-6 (*a*) es muy alta a bajas temperaturas; ello indica que el material es paramagnético; por tanto, puede deducirse que los electrones atrapados son independientes. La susceptibilidad magnética de este electruro disminuye a altas temperaturas, a medida que los campos magnéticos de los electrones se desordenan térmicamente. Un electruro hecho de cesio y un éter de corona más pequeño (*b*) es paramagnético a altas temperaturas, pero posee la susceptibilidad magnética baja propia de los materiales antiferromagnéticos a temperaturas inferiores a 4,3 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). Los electrones atrapados en este electruro están lo suficientemente próximos como para actuar como un gran conjunto a bajas temperaturas, mostrando interacciones de largo alcance. En otro electruro hecho de litio y cierto criptando (*c*), los electrones atrapados forman pares a bajas temperaturas, disminuyendo la susceptibilidad magnética, pero no muestran las propiedades esperadas de los grandes conjuntos. Así pues, cada electrón está unido a otro, aunque cada par de electrones se halla alejado de los otros pares.

muestran el mismo efecto no está del todo claro. Es posible que la razón se deba a la dificultad de fabricar cristales de estos compuestos capaces de soportar el antiferromagnetismo. Sin embargo, puede suceder que las estructuras compactas que se forman en torno a estos cationes más pequeños den lugar a materiales cualitativamente diferentes.

Una clase diferente de comportamiento magnético se pone de manifiesto en el electruro compuesto de litio y el criptando conocido como [2,1,1] (debido a que una de las cadenas que constituyen las "barras" del criptando incluye dos átomos de oxígeno, mientras que las otras sólo incluyen uno). Este compuesto es paramagnético para temperaturas elevadas; ahora bien, para temperaturas más bajas el paramagnetismo del compuesto disminuye, tendiendo a cero para una temperatura de cero grados Kelvin.

Este comportamiento magnético se pone de manifiesto en los materiales cuyos electrones interaccionan por parejas. A altas temperaturas, los pares electrónicos se rompen en virtud de la energía térmica y los electrones aislados resultantes se comportan paramagnéticamente, pero a bajas temperaturas la formación de pares de electrones es posible. Los campos magnéticos de los dos electrones que constituyen el par están orientados en direcciones opuestas y, en consecuencia, se anulan mutuamente. Por tanto, el par, como un todo, no muestra comportamiento paramagnético. El carácter magnético de este electruro sugiere que el cristal posee una estructura básica en la que cada cavidad aniónica está lo bastante próxima a otra cavidad para que los electrones correspondientes interaccionen como un par, pero demasiado lejos de otros pares para interaccionar apreciablemente con ellos.

Finalmente, el electruro constituido por potasio y el criptando conocido como [2,2,2], que muestra el comportamiento óptico y eléctrico característicos de un metal, evidencia también el comportamiento magnético que cabe esperar de un metal o de un sólido que contenga pares electrónicos débilmente ligados. Aparte de otros efectos menores, este electruro exhibe un paramagnetismo débil que aumenta ligeramente al aumentar la temperatura. En un sistema que contuviese electrones completamente deslocalizados, cabría esperar un paramagnetismo débil que fuese independiente de la temperatura. Aunque en estos materiales la mayoría de los electrones están apareados a cualquier temperatura, existen también electrones desapareados e independientes, y estos electrones son la causa de los efectos paramagnéticos. Cuando la temperatura aumenta, el número de electrones paramagnéticos desapareados crece, dado que algunos pares se rompen en virtud de la energía térmica (pues los electrones de los metales están deslocalizados, los pares se pueden romper con facilidad), y aumenta también la probabilidad de que un electrón desapareado posea la energía suficiente como para no estar alineado con un campo magnético externo. El hecho de que el paramagnetismo de este electruro muy conductor dependa ligeramente de la temperatura sugiere que, si los electrones están deslocalizados, pueden moverse en parejas a través de la red cristalina.

Interacciones con los núcleos próximos

Cuando estudiamos los electruros, nos gustaría conocer no sólo la forma en que los electrones interaccionan entre sí, sino también cómo interaccionan con los cationes, que son sus vecinos inmediatos. Por ejemplo, ¿cuánto tiempo pasa un electrón atrapado en la proximidad de los cationes vecinos, lejos del centro de su cavidad aniónica?

La resonancia magnética nuclear es un método extremadamente poderoso para contestar a todas estas preguntas. Al igual que los electrones, los núcleos atómicos originan un campo magnético intrínseco. Cuando un núcleo se sitúa en un campo magnético externo, su energía total es más baja si su propio campo magnético se orienta en la misma dirección que el campo externo, en lugar de hacerlo en la dirección opuesta. Sin embargo, la energía electromagnética puede "girar" un núcleo desde un estado de baja energía a un estado de alta energía. El núcleo absorberá sólo aquellos fotones que tengan la energía adecuada para inducir dicha transición.

La energía de la transición depende de las características de los núcleos, de su entorno y de la intensidad del campo magnético. Colocando un material en un campo magnético externo constante y determinando la energía de los fotones que absorbe, se pueden estudiar las características de los núcleos que lo constituyen y de su entorno electrónico.

Mediante el estudio del entorno electrónico de los cationes de un electruro, la resonancia magnética nuclear puede revelar cuánto tiempo pasan los electrones atrapados cerca de un catión. Los electrones atrapados aislados son paramagnéticos —sus campos magnéticos se alinean con cualquier campo externo— y, por tanto, el campo magnético de tales electrones en las proximidades de un núcleo se suma al campo externo para producir un campo magnético total más intenso en la vecindad del núcleo en cuestión. Estos campos fortalecidos afectan a la cantidad de energía necesaria para "girar" el núcleo. En consecuencia, la longitud de onda de los fotones que los núcleos absorben constituye una medida directa de la densidad de electrones aislados en la vecindad del núcleo.

Nosotros hemos comparado el espectro de resonancia magnética nuclear de los átomos de cesio aislados con el espectro de los cationes de cesio en los electruros de cesio y complejantes 18-corona-6, y hemos encontrado que los electrones atrapados interaccionan muy débilmente con el núcleo. Cada núcleo tenía un electrón paramagnético en su vecindad sólo un 0,03 por ciento del tiempo.

Interacciones del catión

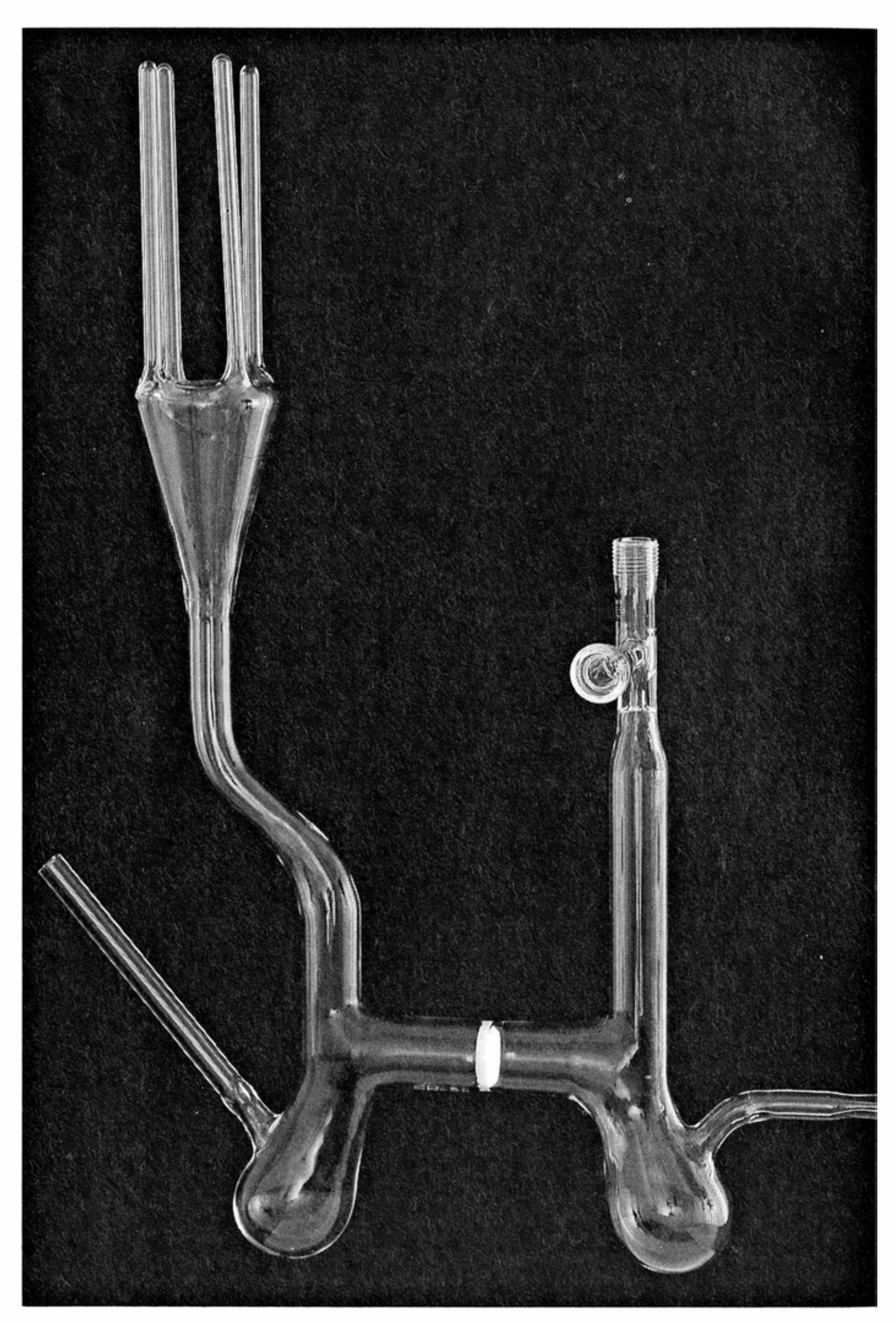
En el curso de una prueba distinta, hemos abordado otra cuestión: determinar si un catión interacciona de la misma forma con los ocho electrones de su entorno, al igual que interaccionan uniformemente los cationes de las sales iónicas verdaderas con todos los aniones en su entorno. Para contestar a esta pregunta, nos basamos en la semejanza estructural existente entre el electruro de cesio y complejantes 18-corona-6 y el alcaluro de cesio, complejantes 18-corona-6 e iones de sodio cargados negativamente. Procedimos a preparar una muestra del electruro de cesio 18-corona-6 en presencia de sodio, de forma tal que algunos aniones de sodio sustituyeran a los electrones aniónicos atrapados y analizamos posteriormente los cristales resultantes por resonancia magnética nuclear.

La densidad de electrones en el entorno de algunos cationes de cesio era sólo siete octavos de la densidad usual; en otros cationes, la densidad era igual a tres cuartos o incluso cinco octavos, como mucho, de la densidad usual. Nuestra conclusión fue que, en estos casos, uno, dos o tres de los ocho emplazamientos aniónicos que rodean cada catión estaban ocupados por aniones de sodio, y no por electrones. Dado que la extracción de cualquiera de los ocho electrones produce el mismo efecto, este resultado demostró que un catión en un electruro no se enlaza de forma particularmente fuerte a ningún electrón, o viceversa.

Estos y otros estudios confirmaron nuestro marco teórico: las estructuras localizadas son simples sales iónicas en las que todos los lugares aniónicos están ocupados por electrones atrapados. No parece existir una especial relación entre un electrón atrapado y cualquiera de los cationes que lo rodean, y los electrones permanecen la mayor parte del tiempo en las cavidades o en su vecindad, pero no en las proximidades de los cationes que los rodean.

Aplicaciones posibles

Además de su interés intrínsecamente científico, los electruros podrían utilizarse algún día en muchas aplicacio-



9. APARATOS DE SINTESIS para producir cristales de electruro. El complejante (éter de corona o criptando) se coloca en un bulbo (*abajo, a la izquierda*); el metal que proporciona los cationes se sitúa en otro bulbo (*abajo, a la derecha*). Se introduce un disolvente en el bulbo que contiene el complejante y el aparato se inclina para que el complejante disuelto se derrame sobre el metal a través de un filtro de vidrio. El metal se disuelve y el aparato se inclina de nuevo para que toda la disolución vuelva a derramarse, a través del filtro, dentro del primer bulbo (el filtro retiene a trozos de metal no disueltos). Cuando se añade un disolvente más débil y se enfría la disolución, los cristales de electruro se forman espontáneamente. Se extrae el disolvente y el aparato se invierte, a fin de recoger los cristales en tubos finos de cristal. Los tubos se cierran al fuego y se almacenan. Este aparato de cristal fue construido por el maestro vidriero Keki Mistry.

nes. Pueden disolverse en varios medios para crear electrones disueltos (electrones que están libres en la disolución). Los electrones disueltos en amoníaco líquido se utilizan profusamente en síntesis industrial, pero existen ciertas reacciones en las que no puede utilizarse el amoníaco líquido, bien sea porque algunas veces cede protones, o bien porque un cierto reactivo no es soluble en amoníaco líquido. En consecuencia, la posibilidad de disolver electruros en otros disolventes podría ser bastante útil en muchos procesos de síntesis.

Dado que los electrones de los electruros localizados se hallan tan débilmente ligados, estos cristales podrían resultar efectivos como detectores fotosensibles en fotomultiplicadores sensibles al infrarrojo. En estos dispositivos, un fotón incidente libera a un electrón, produciendo una pequeña corriente eléctrica. El mismo enlace débil podría también hacer que los electruros resultaran útiles en convertidores de energía solar y como cátodos de baterías.

La principal dificultad para la incorporación de los electruros en nuevos dispositivos electrónicos es su tendencia a descomponerse. En nuestro laboratorio, estamos intentando sintetizar electruros que no se descompongan espontáneamente a la temperatura ambiente. Por su propia naturaleza, todos los electruros (que contienen electrones ligados muy débilmente) deben reaccionar con el aire y la humedad, que aceptan electrones con facilidad. Sin embargo, existen motivos para creer que podemos producir electruros que, por lo demás, sean estables.

Por ejemplo, hemos hecho experimentos con un complejante llamado hexacicleno de hexametilo, que es similar al 18-corona-6, excepto en que los átomos de oxígeno están reemplazados por átomos de oxígeno que tienen grupos auxiliares ligados a ellos. Hemos encontrado que un alcaluro constituido por cationes de potasio, complejantes de hexacicleno de hexametilo y aniones de sodio es extremadamente estable: permanece como tal a temperaturas muy altas, de 45 grados Celsius. El paso siguiente será ver si podemos sintetizar electruros estables basados en complejantes de este tipo. Si tenemos éxito en la producción de electruros estables, esta nueva forma de materia cristalina podría alcanzar muchas aplicaciones tecnológicas, además de abrir una nueva ventana para el conocimiento de las interacciones entre los electrones de los sólidos.

Mimetismo vegetal

Hay flores que parecen insectos y malas hierbas que se hacen pasar por cultivos. El mimetismo de los vegetales es fruto de la selección natural: atrae a los polinizadores y ahuyenta a los depredadores

Spencer C. H. Barrett

Las adaptaciones de las plantas llegan a ser extraordinariamente complejas. Ciertas especies de orquídeas, por ejemplo, imitan a la hembra de la abejas; otras plantas ofrecen el aspecto de animales muertos, cuyo olor despiden, y aun las hay que semejan piedras. Esas extrañas adaptaciones ilustran sólo algunos de los refinados medios de que se valen las plantas para acrecentar la probabilidad de sobrevivir.

Que una especie imite a otra para engañar a un enemigo y con ello escapar de la depredación ha fascinado a los biólogos durante más de un siglo. Tan peculiar estrategia de supervivencia fue descrita, en 1862, por el naturalista inglés Henry W. Bates, quien observó que, entre algunas mariposas sudamericanas de colores vivos, casi idénticas entre sí, unas eran venenosas y otras eran absolutamente inofensivas. Supuso que la especie inocua se disfrazaba de ponzoñosa al objeto de evitar que se la comieran, y dio al fenómeno el nombre de mimetismo; hoy se conoce como mimetismo batesiano.

El mimetismo de los vegetales no ha centrado la atención de los botánicos hasta hace poco. Lo que se explica, en parte, porque antes los vegetales solían estudiarse en relación con su ambiente físico, y en parte también porque el mimetismo es menos frecuente entre las plantas que entre los animales. (Cuya causa reside probablemente en su carácter sedentario y en su propensión a agruparse; los herbívoros, en consecuencia, acaban por aprenderse la localización de cada planta y distinguirla de las demás.) Las observaciones realizadas en 1793 por el naturalista alemán Christian K. Sprengel brindaron una primera pista de que las plantas, igual que los animales, imitaban a otras especies. Sprengel descubrió que ciertos vegetales, en particular las orquídeas, adoptaban el aspecto de especies nectáreas que ocupaban el mismo hábitat, en vez de secretar ellas su propio néctar.

Las relaciones entre las plantas y otras especies de su entorno no fueron objeto de investigación hasta bien entrado nuestro siglo, cuando la ecología surge como disciplina con entidad propia. A partir de ese momento, los análisis revelan que las interacciones entre plantas y animales cubren la gama entera que va desde las asociaciones mutuamente beneficiosas (los sistemas de polinización) hasta las antagonistas (la defensa contra los herbívoros). El mimetismo puede intervenir en todos esos sistemas, y a medida que los botánicos avanzan en el estudio de esas interacciones, resulta más evidente que el mimetismo vegetal está más difundido de lo que antaño se supuso.

El mimetismo, animal o vegetal, es un sistema a tres bandas. Existe un modelo: el animal, planta o substrato a imitar; un mimeta: el organismo imitador del modelo, y un receptor de señales, o incauto: el animal incapaz de distinguir el modelo del mimeta. Los caracteres miméticos incluyen estructuras morfológicas, pautas de color, comportamientos y todos los atributos del mimeta que fomentan el parecido con el modelo; puede ser éste una especie no emparentada, un objeto inanimado o el mismo entorno donde suele vivir el organismo.

El mimetismo no constituye ninguna estrategia activa de la planta; las flores no engañan ni burlan deliberadamente a los animales que las visitan. Aparece como resultado de la evolución por selección natural y con el concurso de mutaciones aleatorias, que conducen, al cabo de muchas generaciones, a la aparición de caracteres favorables. Si, por ejemplo, tales caracteres genéticos contribuyen a camuflar la planta, es de suponer que su probabilidad de supervivencia será mayor que la de otros ejemplares menos disimulados. La planta dejará más descendientes y transmitirá así la ventaja a la generación siguiente. Para que la selección natural favorezca la evolución del mimetismo, el mimeta ha de obtener cierta ventaja reproductora de la adopción de patrones característicos de otro organismo u objeto; su eficacia biológica, o aptitud (*fitness*), medida por el número de descendientes que sobreviven en la generación siguiente, ha de ser mayor de resultas del engaño.

Pocas veces se ha comprobado ese extremo en estudios de campo sobre mimetismo animal, en parte porque seguir la pista de las dos o (lo más frecuente) tres especies que interactúan suele plantear problemas logísticos. Las plantas, al menos durante la fase vegetativa de su ciclo biológico, están inmóviles y, por tanto, su observación y manipulación bajo condiciones de campo experimentales resulta más fácil. En el caso de los herbívoros, es obvio que la mera supervivencia confiere automáticamente a la planta una mayor aptitud respecto de los individuos menos afortunados que son depredados. En la polinización, el número de polinizadores atraídos a la planta y la cantidad de frutos y semillas producidos pueden considerarse una estimación de la aptitud reproductora.

En la mayoría de los sistemas de polinización, la planta y sus polinizadores se benefician por igual, y se crea una relación de mutualismo. La planta ofrece una recompensa alimentaria en forma de polen y néctar; en contrapartida, durante el transcurso de su actividad alimentaria, los polinizadores transfieren polen entre ejemplares de la misma especie, que se fecundan y forman semillas. Ciertas plantas explotan esa relación y fomentan la visita de polinizadores pese a que no ofrecen ninguna recompensa a cambio. Lo consiguen imitando varias características físicas y químicas (color, textura, olor o forma) de especies próximas que sí

excretan copiosas cantidades de néctar. Los insectos, incapaces de distinguir el modelo del mimeta, polinizan ambos.

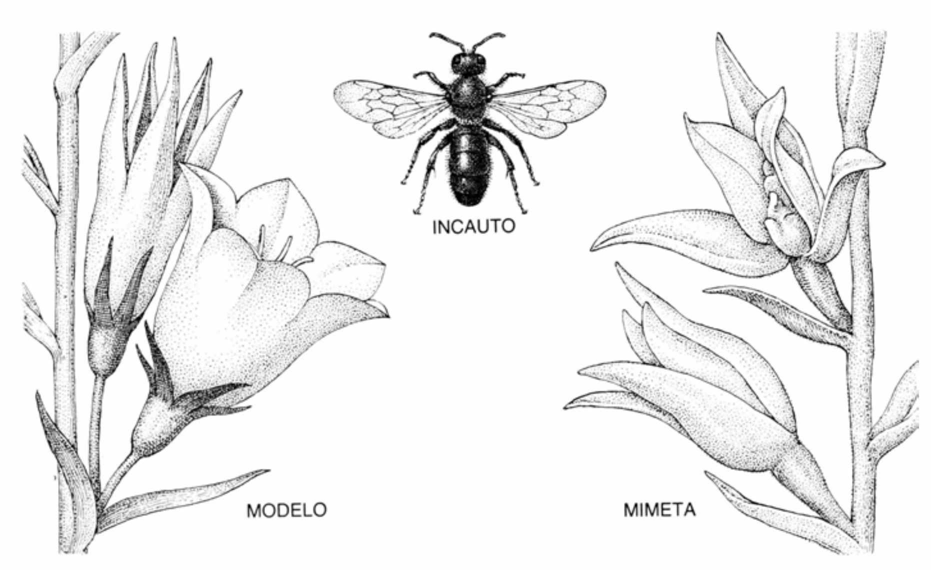
L. Anders Nilsson, del Instituto de Botánica Sistemática de Uppsala, describió recientemente un ejemplo de semejante engaño, cuyo fundamento no resulta inmediato para el observador. Las flores de varias especies del género *Campanula* componen el modelo de ese complejo mimético; el mimeta es la orquídea *Cephalanthera rubra*. Ambas flores viven juntas en hábitats boscosos, secos, de Europa occidental y mediterráneos, donde son visitados regularmente por dos especies de abejas solitarias: *Chelostoma fuliginosum* y *C. campanularum*. En lo demás, los dos tipos de flor guardan escaso parecido entre sí. Difieren tanto en la forma como en el color (las de la orquídea son rosas; las de las campánulas, azul violado), y pertenecen a distintas familias. Además, al contrario que las orquídeas, las campánulas producen néctar abundante para las abejas que las visitan.

Nilsson observó que los machos de las abejas *Chelostoma* volaban hacia las flores de *Cephalanthera*, aterrizaban sobre ellas y entraban de cabeza en la flor, era de suponer que en busca de recompensas florales. Al no encontrar néctar, retrocedían, y entonces rozaban los sacos de polen amarillo, los polinios, que se adherían al tórax de la abeja mediante una substancia pegajosa excretada por el órgano sexual femenino de la flor, el estigma. Cuando la abeja remprendía el vuelo, se llevaba consigo los polinios y depositaba el polen en el estigma de la siguiente orquídea que visitaba. Nilsson siguió la trayectoria de las abejas y descubrió que, por no discriminar entre los dos tipos de flor, polinizaban ambas especies con éxito. Se preguntó por qué las orquídeas, que tienen un aspecto inconfundible y no producen néctar, resultaban tan atractivas para las abejas que las polinizaban.

Nilsson resolvió la paradoja con ayuda de un espectrofotómetro —el aparato que mide las longitudes de onda de la luz reflejada por un objeto. Aunque los colores de la orquídea y la campánula resultan muy diferentes al ojo del observador humano, descubrió que las curvas de reflectancia de ambas flores son prácticamente idénticas en la banda visual de las abejas. La orquídea aparece roja al ojo humano, porque re-



1. ENGAÑADA POR SEÑALES físicas y químicas, la avispa *Campsoscolia ciliata* intenta aparearse con la orquídea *Ophrys speculum*. El labelo, o labio inferior de la flor, tiene aproximadamente el mismo tamaño, forma y vellosidad que una hembra; al parecer, los machos son incapaces de distinguirlos. Así, la orquídea es polinizada por las avispas que visitan una flor tras otra en busca de pareja. La pseudocópula está particularmente extendida por los trópicos.



2. EL MIMETISMO es un sistema a tres bandas en el que intervienen un modelo, un mimeta y un incauto. En la figura, el modelo es la campánula *Campanula persicifolia* (*izquierda*), que produce abundante néctar —substancia que atrae a los polinizadores. La orquídea *Cephalanthera rubra* (*derecha*) no lo produce, pero imita a la campánula y, así, engaña al incauto, la abeja *Chelostoma fuliginosum* (*centro*), que la visita para alimentarse. Los colores de ambas flores le parecen iguales a la abeja, que poliniza las dos especies.

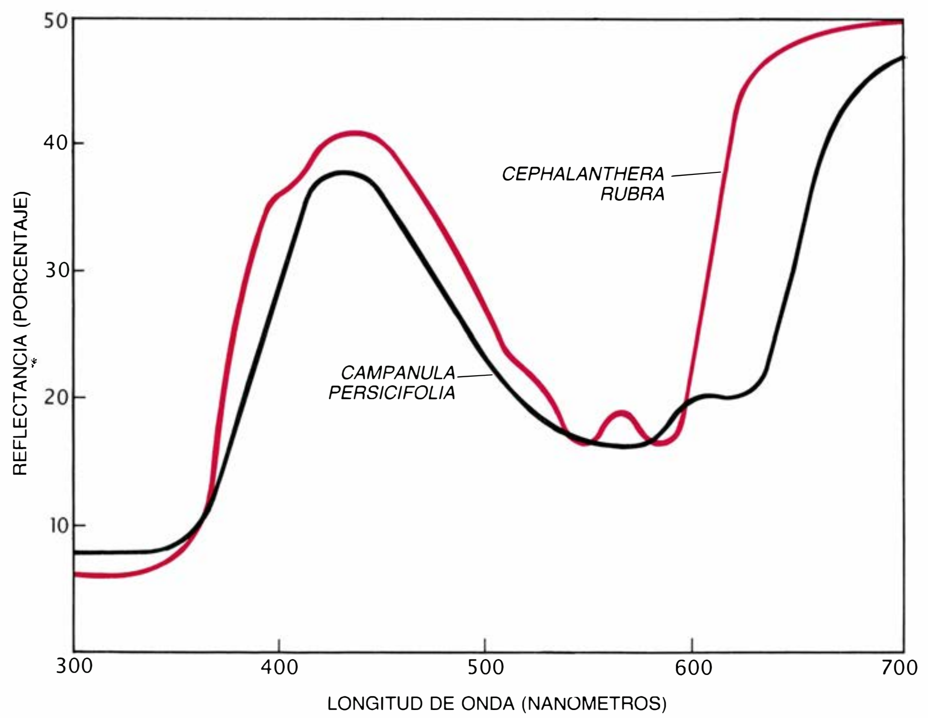
fleja luz en el extremo rojo del espectro (en la banda de los 600 a 650 nanómetros), pero las abejas ven mejor en el extremo ultravioleta; como otros muchos insectos, no distinguen tonos de rojo. Por tanto, para la abeja, la orquídea y la campánula son idénticas; al parecer, en ese sistema de engaño, la forma y el aroma son secundarios.

Así pues, los machos de las abejas *Chelostoma* visitan, engañados, las flores de *Cephalanthera* —comportamiento que reporta pocos beneficios a la abeja, pero muchos a la planta: la polinizan sin tener que brindar a cambio recompensas florales. La comparación del éxito reproductor de la orquídea en hábitats donde coexiste con las campánulas y sus abejas polinizadoras y en otros donde no se registra esa coexistencia muestra que las orquídeas multiplican claramente su eficacia biológica imitando a las campánulas. La producción de frutos en esas zonas sextuplica el rendimiento de las regiones donde la orquídea vive sin la compañía de campánulas.

La familia de las orquídeas ofrece por doquier ejemplos de mimetismo bastante más curiosos que éste. En una de sus añagazas, las flores de varias especies de orquídea imitan hembras de insectos. Las orquídeas no segregan néctar, pero desprenden un aroma muy similar a la feromona sexual de la especie de insecto que imitan. Además, el labelo, o labio inferior de la flor de la orquídea, presenta una forma y una textura análogas a las del insecto imitado. Por ejemplo, en las orquídeas que atraen abejas, el labelo está cubierto de pelos.

Varias especies del género europeo *Ophrys* han evolucionado tan estrechamente vinculadas a sus insectos polinizadores que emiten una fragancia similar, si no idéntica, a la de la hembra del insecto modelo. En algunos casos, la orquídea toma el nombre de la clase de insecto (mosca, avispa, abeja) que la poliniza. Los machos, sobre todo si no se han apareado con hembras, son atraídos hacia las flores de la orquídea e itentan copular con ellas. Desde la perspectiva de la planta, la pseudocópula es, a todas luces, una estrategia eficaz. Cuando el insecto aterriza en la flor, entra en contacto con los polinios de la orquídea. Frustrado en su intento de apareamiento, el insecto remonta el vuelo en busca de una pareja más apropiada, llevándose los polinios a otra flor de la misma especie, donde persistirá en sus afanes amorosos.

La pseudocópula representa una de las formas más fraudulentas y complejas de zoopolinización de las plantas con flor. Ha evolucionado de modo independiente en tres continentes (Australia, Eurasia y Suramérica) y está particularmente extendida por los trópicos, donde muchas orquídeas se reproducen por ese método. ¿Por qué los insectos, que no perciben beneficio manifiesto alguno, se prestan a semejante adaptación? ¿No favorecería la selección natural la supervivencia de los machos capaces de conservar sus energías por distinguir una flor de una hembra de su misma especie? Una posible explicación es que el período de floración de la orquídea se sincroniza con la eclosión de los machos adultos del estadio de pupa. (A menudo, los machos salen antes que las hembras.) Los machos recién salidos compiten fuertemente por las hembras adultas disponibles; se supone que, en esas circunstancias, es escasa su capacidad de discriminación. En un estado tal de frustración sexual, muchos machos se encuentran prestos



3. COLORES DEL MODELO y del mimeta, que le parecen distintos al hombre, capaz de percibir la luz de longitudes de onda próximas al extremo rojo del espectro visible (*derecha*), donde difieren las reflectancias de estas flores. Sin embargo, en el extremo azul-ultravioleta del espectro (entre unos 300 y 550 nanómetros), las curvas de reflectancia de una y otra flor son casi idénticas y a la abeja los colores le parecen iguales.

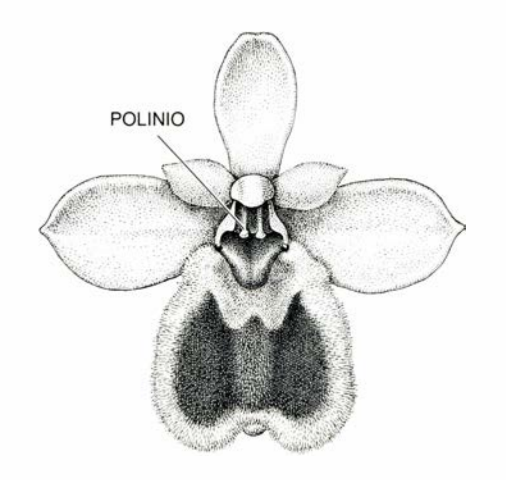
a dejarse engañar por la fragancia y el aspecto de las flores de la orquídea.

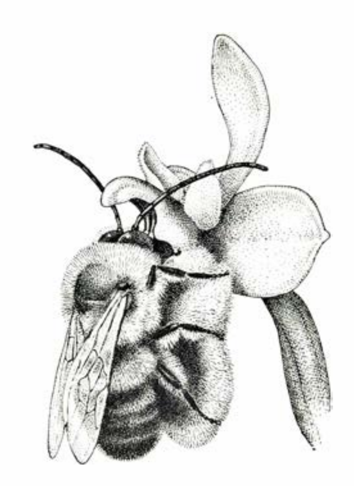
En el extremo opuesto a las ostentosas flores asociadas con la pseudocópula figura la estrategia de polinización en la que la planta adopta características propias de la carne en descomposición. Esas plantas han desarrollado, por evolución, caracteres que repugnan al ser humano pero que atraen a las moscas y otros insectos carroñeros: olores pútridos, colores carnosos y abundante pilosidad. Uno de los más eficientes imitadores de carne podrida es *Amorphophallus titanum*: ejemplar de casi dos metros y medio de altura procedente de Sumatra, su hedor es tan fuerte que se cuenta de personas que han perdido el conocimiento por olfatearla demasiado de cerca.

Los mimetas de carne podrida rara vez ofrecen néctar u otra recompensa alimenticia. Antes bien, engañan a sus polinizadores presentándose como lugar de alimentación idóneo para presas en desarrollo, que suelen alimentarse de tejidos de animales muertos. Las moscas hembras, confundidas por el olor a carne en descomposición, se posan sobre las flores y, en algunos casos, llegan incluso a depositar huevos en ellas. Igual que los machos que van de flor en flor en busca de pareja, las hembras transitan de un mimeta de carne podrida a otro en pos de un lugar donde poner los huevos. En su deambular, recogen inadvertidamente polen sobre el cuerpo y lo transportan al estigma floral, polinizando la especie.

Algunas plantas imitan a otros miembros de su propia especie —forma de engaño conocida como mimetismo bakeriano, en honor de Herbert G. Baker, de la Universidad de California en Berkeley, su descubridor. Se sabía desde tiempo atrás que los miembros de la familia de la papaya, Caricaceae, son dioicos: las flores masculinas y las femeninas están en pies distintos. En esta familia, las flores de uno y otro sexo difieren notablemente —fenómeno que recibe el nombre de dimorfismo sexual. Las masculinas poseen un largo tubo floral, mientras que las femeninas tienen los pétalos libres, dispuestos en torno a un gran ovario verde; las flores masculinas producen néctar, pero las femeninas no.

Baker se preguntó cuál sería el mecanismo de polinización. ¿Qué atraía a los insectos hacia la flor femenina, que no produce néctar ni polen? Estudiando las interacciones de la planta de la papaya con sus visitantes, observó que la polinizaban principalmente insectos





4. PSEUDOCOPULA entre dos especies mediterráneas, la abeja *Eucera nigrilabris* y la orquídea *Ophrys tenthredinifera*; facilita la polinización de la planta. Para una abeja macho, la flor (*izquierda*) tiene la misma apariencia que una hembra con las alas extendidas. La abeja se aferra al labelo de la flor e intenta copular con él (*derecha*). Al hacerlo, roza los polinios: masas de polen que penden del labio superior de la flor y que se adhieren a su cuerpo. Cuando la abeja remonta el vuelo, transporta los polinios a otra flor de *Ophrys*.

crepusculares —como las mariposas nocturnas de la familia Sphingidae—, que visitaban flores masculinas y femeninas por igual. Llegó a la conclusión de que, a los esfíngidos que sobrevuelan las plantas cuando la intensidad lumínica es escasa, las flores de ambos sexos deben de resultar muy parecidas. Baker bautizó el fenómeno "polinización por error".

En la mayoría de las especies vegetales dioicas, las plantas masculinas producen bastantes más flores que las femeninas. Kamaljit S. Bawa, de la Universidad de Massachusetts en Boston, opina que la proporción sesgada de flores en las plantas dioicas ha instado una intensa selección natural en favor de las flores femeninas adaptadas al patrón visual de búsqueda desarrollado por los polinizadores que visitan las flores masculinas. Tal engaño resulta coherente con las reglas del mimetismo: en la familia Caricaceae, el modelo (la flor masculina) abunda mucho más que el mimeta (la flor femenina). Por este motivo, los biólogos creen que en las especies dioicas el mimetismo podría haberse difundido más de lo que se supone; en ese sentido, interesa observar que las flores masculinas y femeninas de plantas polinizadas por animales tienden a parecerse, mientras que las de plantas polinizadas por el viento no.

No todo el mimetismo vegetal está sesgado en un sentido, como en el batesiano, donde una especie obtiene todo el beneficio por imitar a otra. Es frecuente entre los animales, aunque raro en las plantas, el llamado mimetismo mulleriano (en honor de Fritz Müller, zoólogo alemán del siglo XIX que lo describió). En este género de mimetismo, varias especies no emparentadas adoptan una fisonomía y un comportamiento parecidos. Al formar un grupo de estas características, las plantas pueden beneficiarse de un "estilo publicitario" común —estrategia que atrae más polinizadores que si cada especie se anunciara por su cuenta.

El mimetismo mulleriano difiere del batesiano en que no esconde engaño alguno, no existe una distinción clara entre modelo y mimeta, y todas las partes contribuyen por igual, es decir, todas ofrecen recompensas florales de parejo valor. Por esa razón, algunos botánicos sostienen que el mimetismo mulleriano no es en realidad un mimetismo, sino mera consecuencia de que los organismos que viven en el mismo hábitat evolucionan de forma parecida —fenómeno conocido como evolución convergente. (Un ejemplo clásico de convergencia es la evolución del carácter suculento en las plantas del desierto. En respuesta a la necesidad de conservar el agua en los ambientes áridos, diversas especies no emparentadas han desarrollado hojas gruesas y tejidos pulposos.)

Existen también asociaciones florales que parecen combinar elementos de los sistemas batesiano y mulleriano. Ejemplo de esa categoría, pendiente aún de verificación, es un complejo de tres especies amarillo-anaranjadas polinizadas por mariposas: *Lantana camara*, de la familia de la verbena, *Asclepias curassavica*, de la familia del vincetósigo, y *Epidendrum radicans*, una orquídea. Las tres especies conviven en las cunetas de las carreteras de los trópicos americanos, donde reciben la visita de los mismos ejemplares de mariposa.

Según parece, *Lantana* y *Asclepias*, que producen abundante néctar, son

mimetas mullerianos mutuos. *Epidendrum*, que no produce néctar, pasa por ser mimeta batesiano de los otros dos. Las tres especies satisfacen los criterios externos de los complejos miméticos: viven en la misma zona y tienen flores de tamaño y color similares. Sin embargo, un trabajo reciente no ha logrado demostrar que alguna de esas especies se polinice más (y deje, por tanto, más descendientes) cuando se presenta asociada con las otras dos que cuando está sola.

Las plantas no siempre imitan a otros organismos, ni siempre han de engañar para que las polinicen. En algunas especies, el mimetismo ha evolucionado en respuesta a la depredación animal. Ciertas especies remedan la forma, tamaño, color e incluso textura de un fondo inanimado, hasta el punto de quedar camufladas frente a posibles herbívoros. Por ejemplo, varios centenares de especies de la familia de la escarchada, Mesenbryanthemaceae, han desarrollado un sorprendente parecido con piedras y guijarros. La imitación de piedras está logradísima en el género *Lithops*: la planta entera simula una piedra hasta el punto de resultar prácticamente imposible distinguirla de un fondo de vegetación baja, sobre todo en la época seca, cuando se marchita y se cubre —hecho muy frecuente— ligeramente de arena.

Delbert Wiens, de la Universidad de Utah, cree que ciertos animales, así pequeños mamíferos, aves que hurgan en el suelo o ungulados que otrora vagaron por las llanuras de Africa en grandes manadas, pueden haber dado origen a la fuerza selectiva que ha llevado a la proliferación de esas formas miméticas. Al pacer en vegetación baja, los animales devorarían cuanto tuviera aspecto de planta, aunque fuera lejanamente, en particular durante la estación seca, cuando muchas se marchitan y mueren. A favor de esa hipótesis figura el hecho de que las flores de *Lithops* (que son conspicuas) tengan una vida breve y aparezcan sólo durante la estación húmeda, cuando los animales de pasto disponen de hierba en abundancia. El problema de identificar las presiones de selección responsables del mimetismo pétreo viene a recordarnos que la vida evoluciona sin pausa. Cuando se altera la intrincada relación entre modelo, mimeta e "incauto" —por ejemplo, debido a la intromisión humana—, puede que sólo subsistan intactos fragmentos del complejo mimético original. En esos casos, el extraordinario parecido entre los modelos y sus imitadores es una fascinante instantánea de procesos evolutivos pretéritos que han dejado de operar.

No todos los mimetismos vegetales reflejan acontecimientos evolutivos del pasado remoto. Uno de los más des-



5. *STAPELIA NOBILIS*, de Africa meridional, cuyo color y hedor remedan los de la carne en descomposición. Para un insecto, los pétalos rojos de la flor, cubiertos de finos pelos, ofrecen el aspecto y el tacto de la piel. La mosca hembra que aparece en la fotografía, incapaz por lo visto de percibir la diferencia entre la planta y el cadáver de un animal, acaba de depositar una masa de huevos blancos en el fondo de la flor y, en su deambular, recoge polen del mimeta. Las larvas que emergen de estos huevos requieren proteína animal para su desarrollo, y morirán al poco por falta de una provisión de alimento adecuada.

tructivos depredadores de plantas es *Homo sapiens*, y diversos estudios sobre plantas cultivadas señalan que las prácticas agrícolas han ejercido una enérgica influencia sobre la genética y evolución de ciertas malas hierbas. Con el advenimiento de la agricultura se hizo necesario el control de las cizañas que invaden los terrenos agrícolas y reducen los rendimientos, pues compiten por los nutrientes y la luz con las especies cultivadas.



6. **IMITACION de piedras, que alcanza su máxima expresión en el género *Lithops* de Africa meridional. Vistas de lejos, cuesta distinguir estas tres plantas de los guijarros que las rodean; durante la estación seca, se marchitan y resultan casi invisibles aun a corta distancia, para protegerse, parece, de la depredación.**

Desde que se inició la domesticación de vegetales, el campesino ha arrancado a mano las malas hierbas; y a pesar del empleo generalizado de herbicidas, la escarda manual aún es práctica corriente, sobre todo en los países menos desarrollados. En el proceso de eliminación de las malas hierbas, a mano o con azada, el agricultor se enfrenta al problema de distinguir la planta cultivada de la cizaña. En la mayoría de los casos resulta fácil diferenciarlas. Sin embargo, cuando la especie cultivada y la mala hierba presentan una apariencia similar, es muy fácil no reparar en la segunda por confusión con la primera. Es muy probable que así suceda cuando la cizaña crece diseminada en lo cultivos y con una densidad relativamente baja; pero también puede ocurrir con altas densidades de cizaña, cuando la dureza de la escarda manual menoscaba la capacidad de discriminación del trabajador, lo que se traduce en un aumento de los errores.

Mi interés por tan fascinante tema nació cuando investigaba en Swazilandia las plagas de arroz silvestre en los sembrados. En los años 1950, dos especies de arroz silvestre, *Oryza rufipogon* y *O. punctata*, invadieron los arrozales y se multiplicaron y propagaron con rapidez. Dada la semejanza entre las especies silvestres y la doméstica, no se advirtió la magnitud de la invasión hasta que las poblaciones cizañadores habían crecido demasiado para controlarlas eficazmente. En mis observaciones de la escarda manual practicada por los campesinos comprobé que la distinción entre las diferentes plantas de arroz era muy difícil y que, a menudo, los invasores quedaban en pie.

Como en la mayoría de los campos cultivados, la escarda de los arrozales suele efectuarse durante las primeras etapas de crecimiento de la siembra, cuando la competencia entre el arroz agrícola y las cizañas invasoras es máxima. Por consiguiente, la mayoría de los mimetas cizañadores imitan el estadio de plántula del ciclo biológico del modelo agrícola, y resultan indistinguibles del verdadero cultivo hasta el momento de la floración, cuando el daño ya está hecho.

Observé en Swazilandia que, en ciertas condiciones, el arroz doméstico y el silvestre de la especie *O. rufipogon* hibridaban y producían descendientes viables; la distinción entre cultivo y cizaña resultaba entonces especialmente problemática. Las complejidades de la hibridación entre arroces agrícolas y silvestres han sido extensamente investigadas por el Instituto Nacional japonés de Genética. Sus técnicos descubrieron que los híbridos expresaban ciertos caracteres de los domésticos —como la coincidencia de la floración, la germinación sincrónica y la reducida capacidad de desprendimiento (la propensión de las semillas de arroz a caer prematuramente de la inflorescencia de la planta). Por desgracia, dichos híbridos también conservaban los caracteres que hacen incomestible el arroz silvestre: los granos son pequeños y tienen la cáscara muy dura, lo cual dificulta la molienda. Aún más grave es que los caracteres del domesticado expresados en el híbrido le permiten sobrevivir y proliferar, enredando todavía más el problema de los arroces cizañadores.

En un intento de erradicar las cizañas híbridas de los arrozales, genetistas de la India crearon variedades agrícolas de arroz con hojas de color púrpura. Creían contar así con un medio sencillo y eficaz para que los campesinos que escardaban los arrozales a mano distinguieran las especies cizañadoras de las comestibles. Lamentablemente, el proceso natural de hibridación entre el cultivo y la cizaña, combinado con la escarda manual, condujo pronto a la aparición de arroces cizañadores de hojas púrpuras, perdiendo el color toda utilidad como elemento discriminante.

Las gramíneas del género *Echinochloa* constituyen otra de las plagas principales del arroz cultivado. Figuran entre las malas hierbas más difundidas y nocivas del mundo e infestan distintos tipos de siembras y plantaciones: trigo, algodón y árboles frutales, además del arroz. Se identifican por presentar bases foliares rojizas, hojas caídas y la floración temprana. Empero, entre las especies de *Echinochloa* que infestan los arrozales de Asia han surgido mutaciones que eliminan esas características; la cizaña se parece tanto al arroz agrícola que apenas si se distingue de éste, sobre todo durante el período de crecimiento vegetativo. Sólo el examen detenido de las plantas permite identificarlas: las de arroz agrícola poseen lígulas, breves apéndices de la base de

las hojas. Habría que dedicar a la escarda más tiempo del que suele disponerse, y es frecuente, por tanto, que las especies cizañadoras queden en pie.

Dos mimetas del arroz, *Echinochloa oryzoides* y *E. phyllopogon* (otrora *E. oryzicola*), son hoy cizañas estrictas de los arrozales, propagados desde Asia a muchas de las principales regiones arroceras del mundo, incluida California. Al parecer, penetraron en Estados Unidos contaminando semillas de arroz al poco de iniciarse allí el cultivo de ese cereal, porque se citan como cizañas en los primeros ensayos arroceros de la Biggs Rice Research Station del Valle Central de California. Hoy constituyen una de las plagas más graves del arroz californiano. Aunque en ese estado ya no se practica la escarda manual, puede que el estrecho parecido entre *Echinochloa* y el arroz haya fomentado indirectamente su difusión. A comienzos de siglo, se certificó para su distribución estatal semilla de arroz procedente de campos que se creía libres de malas hierbas, pero que estaban infestados de *Echinochloa*.

Se supone que, como contaminante de las semillas de arroz, el mimeta *E. oryzoides* se exportó de California a Australia, donde se recolectó por vez primera en 1938, en el centro de investigación arrocera de Leeton, Nueva Gales del Sur. Hoy aparece en todas las zonas arroceras de ese estado, a punto de convertirse en un problema agrícola grave. Anthony Brown, de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), y el autor han analizado la variabilidad genética de diversas enzimas presentes en las poblaciones californianas y australianas de *E. oryzoides*. Nuestros datos indican que las poblaciones australianas representan un extracto muy limitado de la información genética existente en las californianas de la misma especie, de lo que se concluye, por tanto, que la variedad de *E. oryzoides* hallada en Australia sólo podía provenir de las existencias ancestrales de California.



7. PLANTULAS DE ARROZ cultivado (*izquierda*), comparadas con otras gramíneas: una mimeta, *Echi-* *phyllopogon* y el arroz es difícil: éste presenta una lígula (pequeño apéndice en la base de las hojas), de la que carece *E. phyllopogon*. Por el contrario, su tallo púrpura rojizo facilita la identificación de *E. crus-galli*.
phyllopogon* y el arroz es difícil: éste presenta una lígula (pequeño apéndice en la base de las hojas), de la que carece *E. phyllopogon*. Por el contrario, su tallo púrpura rojizo facilita la identificación de *E. crus-galli*.

El mimetismo no se circunscribe al estadio vegetativo de las plantas cultivadas; puede expresarse asimismo en otros estadios del ciclo biológico. Por ejemplo, en el tipo de explotación intensiva a pequeña escala que caracteriza el cultivo del arroz en muchas partes del mundo, sobre todo en Asia, el transplante de brotes de los semilleros a los arrozales brinda una nueva oportunidad a la selección humana.

El mimetismo se da también en el estadio de semilla, según describieron a comienzos de siglo botánicos rusos a partir de observaciones realizadas en una variante de la cizaña *Camelina sativa* (var. *linicola*) de los linares de la Unión Soviética. Las plantas de *C. sativa* tienen el tallo delgado, sin ramificar, las hojas pálidas y estrechas y ofrecen toda la apariencia de una planta de lino. La similitud, sin embargo, no es fruto de la selección por escarda manual, que no se practica en los linares, sino de la mera adaptación a sobrevivir en los campos de lino, densamente apiñados y sombríos. El mimetismo de *C, sativa* se manifiesta en las semillas de la planta, similares a las del lino en varios aspectos importantes.

Las semillas de *Camelina* maduran al mismo tiempo que las del lino y, como los frutos que las contienen no son dehiscentes (permanecen sujetos a la planta), se cosechan junto con la siembra. Las semillas que no son de lino suelen eliminarse durante la trilla y la avienta, pero las de *Camelina* han desarrollado propiedades análogas a las del lino. Aunque las semillas de las dos especies tienen distinto aspecto, la aventadora las hace volar a igual distancia. Así, las semillas se mezclan y se siembran juntas la temporada siguiente, lo que asegura la continuidad del complejo mimético. En ciertas zonas de la Unión Soviética, las semillas de



8. EN MUCHOS PAISES poco desarrollados, la escarda del arroz siguen realizándola trabajadores que pasan largas horas arrancando a mano las cizañas de los arrozales. Las malas hierbas que imitan el arroz, que escapan a la detección por la prisa y la fatiga con que se efectúan las labores, han llegado a constituir un grave problema agrícola en algunas regiones. Las mujeres de esta fotografía, tomada en 1969, escardan a mano un arrozal de Swazilandia. A mediados de los años 1970 se abandonó por completo el cultivo del arroz en ese país debido al grave problema que planteaba la invasión de especies de arroz silvestre.

las diversas variedades de lino presentan características distintas. Lo extraordinario es que las semillas de *Camelina* de cada región han evolucionado en paralelo con sus modelos y, por consiguiente, porfían como malas hierbas.

Con la introducción de aventadoras más complejas, además de variedades agrícolas mejoradas, cabe que se rompa —al menos temporalmente— la íntima relación entre el sembrado y la cizaña. Por ejemplo, la introducción, en California, de arroces enanos de maduración temprana permite identificar más fácilmente la contaminación por *E. phyllopogon*. La creación de variedades de arroz que produzcan semillas antes de que maduren las del mimeta probablemente haga fracasar a tan cizañero imitador.

La interacción entre especies siempre resulta impredecible, y un cambio en una de ellas suele desencadenar cambios en la otra. Aunque cabe la posibilidad de que las nuevas presiones selectivas que actúan sobre *E. phyllopogon* lleven a la evolución de mimetas que sincronicen su período de floración con el del arroz, las investigaciones del autor apuntan a que ello es improbable: las poblaciones californianas de *E. phyllopogon* contienen relativamente poca variabilidad genética para caracteres como el período de desarrollo, y ello limita su capacidad de cambio evolutivo.

En los sistemas agrícolas, el mimetismo no es siempre perjudicial para el ser humano. Algunos mimetas cizañadores, en virtud de su parecido con una especie agrícola, se han convertido a su vez en cultivos muy importantes. N. I. Vavilov, de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, fue el primero en observar, a finales de la década de 1920, que en los cultivos de cereales tempraneros, como el trigo, se cosechaban malas hierbas parecidas al centeno y a la avena; cizañas que accidentalmente quedaban expuestas a selección artificial a favor de caracteres domesticados —como semillas grandes, panículas rígidas y retención en la planta. Con el tiempo, las malas hierbas se convirtieron en cultivos útiles por derecho propio y hoy dependen por completo del ser humano para sobrevivir. Vavilov empleó el término "cultivo secundario" para designar esas especies vegetales domesticadas que originariamente fueron cizañas miméticas; el proceso, que no tiene contrapartida entre los fenómenos miméticos de ecosistemas más naturales, se conoce como mimetismo vaviloviano. Que una evolución de ese tipo pueda acontecer con tal rapidez es prueba convincente de la evolución de las adaptaciones por selección natural.

El mimetismo vegetal entraña relaciones ecológicas de muchas clases y cubre un amplio espectro, desde estrategias de polinización basadas en el engaño hasta el sorteo de la depredación mediante camuflaje y la supervivencia de malas hierbas basada en la selección artificial de plantas que imitan especies agrícolas. En cada caso, el mimetismo resulta de la interacción entre mutaciones aleatorias y presiones selectivas del medio ambiente en el que vive el organismo. Así pues, la existencia de mimetismo vegetal es demostración palmaria del poder de la selección natural como fuerza conductora del cambio evolutivo.

Corredor swahili

Los marinos swahili de la costa africana oriental trazaron una ruta marítima, en el siglo x, que hizo posible el transporte de marfil, cuarzo y oro hacia Europa. La labor de este pueblo contribuyó al florecimiento de la Edad Media

Mark Horton

El término "Renacimiento" sugiere a la mayoría de la gente la Italia del siglo xv, y nombres como los de Leonardo da Vinci o Miguel Angel Buonarroti. Sin embargo, cinco siglos antes, en las costas mediterráneas, había tenido lugar un florecimiento cultural que a su vez merece ser considerado también un renacimiento. Cambios políticos, como la fundación del Sacro Imperio Romano en el siglo x al sur de Alemania o la época dorada del Imperio Bizantino y el control que los soberanos fatimíes ejercían por aquel entonces en el Norte de Africa hasta El Cairo, fueron acompañados de grandes renacimientos culturales. Tanto las artes como la artesanía y la arquitectura alcanzaron nuevos grados de sutileza y complejidad y, como consecuencia, surgió una demanda de nuevos y exóticos materiales que, en su mayor parte, no podían ser suministrados desde las costas mediterráneas. ¿De dónde procedían entonces?

La respuesta a esta pregunta es Africa, por lo menos en cuanto al suministro de tres materiales: el oro, el marfil y el cristal de roca (cuarzo transparente). El suministro de los mismos al Mediterráneo requería el establecimiento de una vasta red comercial internacional que se extendiera desde el sur de Africa hasta Sicilia. Piezas fundamentales para el funcionamiento de dicha red, cuya existencia ha sido probada recientemente, fueron los traficantes swahili, quienes transportaban oro, marfil y cristal de roca, recibidos en sus contactos en el interior, al norte, donde los mercaderes musulmanes los llevaban al mundo mediterráneo.

El pueblo africano de los swahili se convirtió al islam en el contacto con sus colegas comerciantes y, en parte, a resultas de esta conversión, emergieron como un coherente grupo social que afianzó la nueva ruta de tráfico y contribuyó a establecer la base del renacimiento europeo que tendría su comienzo en el siglo x.

Sería durante este renacimiento (que se remontaba hasta el principio de la Edad Media) cuando materiales como el oro, marfil y cristal de roca aparecieron en el Mediterráneo en cantidad únicamente equiparable a la que lo hiciera en las épocas griega y romana. La historia del marfil es la que está más documentada de los tres materiales mencionados, ya que había sido usado de manera general en el mundo antiguo y hay muchas tallas en marfil de las épocas clásica y primitiva bizantina, las cuales datan del siglo I d.C. hasta el 600 d.C. Parece ser que poco después del 600 d.C. se agotó el suministro proveniente del norte de Africa y del mar Rojo, pues únicamente se conocen unas cuantas tallas genuinas de marfil de elefante en la Europa de los tres siglos posteriores a tal fecha. Los artesanos del marfil prosiguieron desarrollando su arte mediante el uso de sustitutos tales como el hueso, marfil de morsa, colmillos de narval e incluso marfil de mamut fósil de Siberia.

Hacia el 960 d.C. tuvo lugar un cambio radical expresado por la enorme cantidad de magníficas muestras de tallas de auténtico marfil de elefante que inundaron Europa en el transcurso de una sola década. Este renacimiento se dio tanto en el mundo cristiano, incluyendo Bizancio y la corte del Sacro Imperio Romano, como en el mundo islámico, en España y Sicilia particularmente. Un cambio tan radical puede explicarse si consideramos que el marfil provenía de una fuente aún no explotada. El diámetro del marfil usado en esta época, en su mayoría de más de 110 milímetros, puede constituir una clave para averiguar su procedencia, ya que dicho diámetro corresponde únicamente al de los colmillos del elefante africano, hipótesis corroborada por las pruebas documentales de viajeros musulmanes contemporáneos que afirman que gran parte del marfil procedía del Africa Oriental.

Un modelo similar lo constituye el cristal de roca, el cual había sido tallado y pulido desde tiempos clásicos, al igual que los colmillos de elefante. Las piezas que se conservan son pequeñas, y el cristal, probablemente originario de Europa, a menudo presenta impurezas e imperfecciones. A finales del siglo x, la industria de la talla del cristal evolucionó gracias a la profusión de tallas en cristal de roca que surgieron de los talleres del Egipto fatimí. Las primeras muestras datan del 975 aproximadamente y los sesenta años siguientes de producción fueron tan fructíferos que hoy en día disponemos de más de cien muestras conservadas como procedentes de dichos talleres. Las características comunes a piezas de tal calidad las constituyen su gran tamaño, así como la claridad y perfección del cristal. Como en el caso del marfil, la documentación contemporánea nos sugiere que el origen de este nuevo cristal es el Africa Oriental.

A pesar de que el marfil y el cristal de roca eran muy apreciados, el oro era el producto de mayor importancia para la economía mediterránea, por ser a la vez usado para el intercambio y para el arte. Como elemento comercial ejerció gran influencia, ya que su posesión atraía a los mercaderes y a sus productos. Las monedas de oro fatimíes, acuñadas por todo el norte de Africa, eran particularmente fuertes en este aspecto: el dinar (unidad monetaria del mundo islámico), obra de los metalúrgicos fatimíes que trabajaban bajo el estricto control de los gobernantes, tenía un grado 96 de pureza, grado muy superior al de cualquier otra acuñación rival; ése fue el motivo de que el comercio del sur del Mediterráneo se dirigiera hacia los puertos musulmanes más que hacia los cristianos.

Pero como para atraer el comercio

los traficantes de los puertos musulmanes tenían que cambiar sus dinares por mercancías, el suministro ininterrumpido de oro se hizo indispensable. Aunque se haya atribuido siempre al Africa Occidental el suministro de la mayor parte del oro empleado en las cecas fatimíes, parece que, según otras fuentes, el papel del Africa Oriental en este tema es de igual importancia. El historiador yemení al-Hamdani asegura, en un escrito del 942, que la mina aurífera más productiva del mundo se halla en Ghana, Africa Occidental. Sin embargo, el mismo autor hace afirmaciones que indican la existencia de una vasta y secreta red comercial marítima para el transporte de oro procedente de algunos lugares próximos al océano Indico.

Documentos de la época, muestras de la historia, del arte, así como otras fuentes, nos indican de manera diáfana que la nueva fuente de cristal de roca, oro y marfil para el mundo mediterráneo del siglo x era el Africa Oriental. A pesar de tal irrecusable evidencia, es extraño que la relación existente entre el Africa Oriental y el Mediterráneo haya sido confirmada tan sólo hace unos años. Durante este breve período, otros y yo mismo hemos llevado a cabo descubrimientos arqueológicos que confirman la existencia de tal ruta y que han demostrado el papel protagonista que los swahili tuvieron en su establecimiento.

Los puertos y asentamientos swahili se extendían a lo largo de tres mil kilómetros del litoral del Africa Oriental, y estudios arqueológicos modernos han revelado que unos cuatrocientos emplazamientos, a lo largo de esta estrecha franja costera de asentamientos, estaban habitados antes de que los portugueses llegaran en 1498. Muchos de dichos emplazamientos eran comunidades de pequeñas aldeas, aunque algunas de ellas estaban urbanizadas, con cientos de casas de piedra y población de más de 10.000 habitantes. Estos eran los centros comerciales donde los *dhows* de alta mar, procedentes del Océano Indico, recalaban.

Esta comunidad costera, que he bautizado como Corredor swahili, fue establecida por los antepasados de los swahili que aún hoy en día habitan en esta región. Era un pueblo marinero que construía barcos según diseños propios y cuya navegación de cabotaje seguía los monzones y corrientes estacionales. Esta comunicación costera supuso la base de una cultura común a lo largo del Corredor swahili. Una clave fundamental de dicha cultura fue el islam. Según descripciones árabes contemporáneas los traficantes swahili eran musulmanes que vivían como los pueblos del Oriente Medio.

¿De dónde procedían esos mercaderes musulmanes? Sus orígenes siempre han suscitado polémica. Las tradiciones africanas locales afirman que las ciudades deben su fundación a refugiados que huían de los levantamientos que se produjeron en el Oriente Medio musulmán durante el siglo VIII. Algunos historiadores modernos sostienen que los swahili eran co-

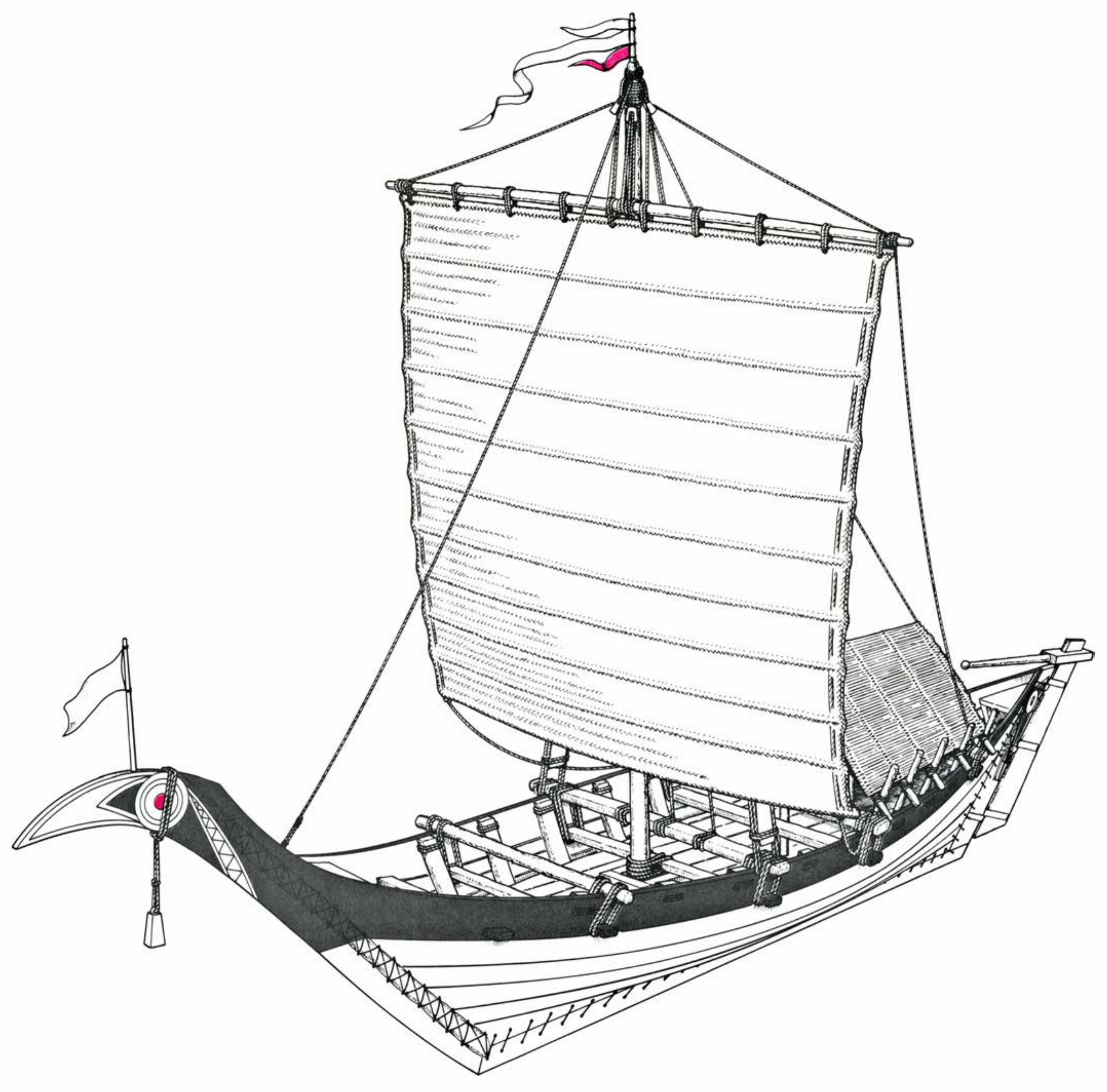


1. ESTE COFRE DE MARFIL es una primitiva muestra representativa del renacimiento de la talla del marfil en el mundo mediterráneo, en el siglo x, debido quizás a los nuevos hallazgos de este material en Africa. El cofre, engastado en plata, mide unos 4,5 centímetros de altura; fue tallado en una sola pieza de marfil y probablemente estaba destinado a servir de joyero. Se trabajó en los talleres reales de Madinat al-Zahra, España, para la hija del soberano omeya Abd al-Rahman III. Las inscripciones, en letra cúfica, constituyen un elemento decorativo. Una de las inscripciones indica que el cofre fue fabricado tras la muerte de Abd al-Rahman en el 961. El marfil destinado a la fabricación de tan bellos objetos provenía, seguramente, del Africa Oriental, siendo transportado hasta el Mediterráneo por medio de una ruta comercial internacional en la que los mercaderes swahili del Africa Oriental desempeñaban un papel predominante.

lonizadores árabes que se casaron con granjeros bantúes de la costa. Sin embargo, las excavaciones que realicé en Shanga, en la isla de Pate, en la costa de Kenya, muestran que la teoría "árabe" es errónea: los swahili eran de origen africano.

El trabajo en Shanga se dividió en cinco campañas de excavación, siendo la primera en 1980. El emplazamiento fue elegido, en parte, porque en su superficie mostraba un conjunto completo de ruinas del siglo XIV. Excavaciones hechas en el centro del mismo revelaron la existencia de cinco metros de yacimientos bajo las ruinas. Los niveles más bajos resultaron ser del siglo VIII y se registraron 25 niveles de ocupación diferentes.

Sin embargo, cuando Shanga fue habitada por primera vez en el siglo VIII no existían asentamientos extranjeros en la costa oriental de Africa. Ciertamente, los niveles correspondientes a la ocupación más primitiva de Shanga parecen ser de estilo puramente africano. Había un grupo de chozas revestidas de barro alrededor de un corral de ganado de forma rectangular; cada grupo del clan tenía su propia verja del corral, el cual era un área de actividad comunal. Aunque probablemente los residentes originarios de Shanga no eran musulmanes, hacia el siglo IX un grupo de élite se convirtió al islam, tal como lo demuestra el descubrimiento de unos agujeros para postes pertenecientes a tres pequeñas mezquitas de madera. La limitada capacidad de estas primitivas mezquitas de madera, que tan sólo podían albergar a 20 personas de una población de unas quinientas aproximadamente, nos indica que la nueva fe estaba destinada a la élite y no al pueblo llano.



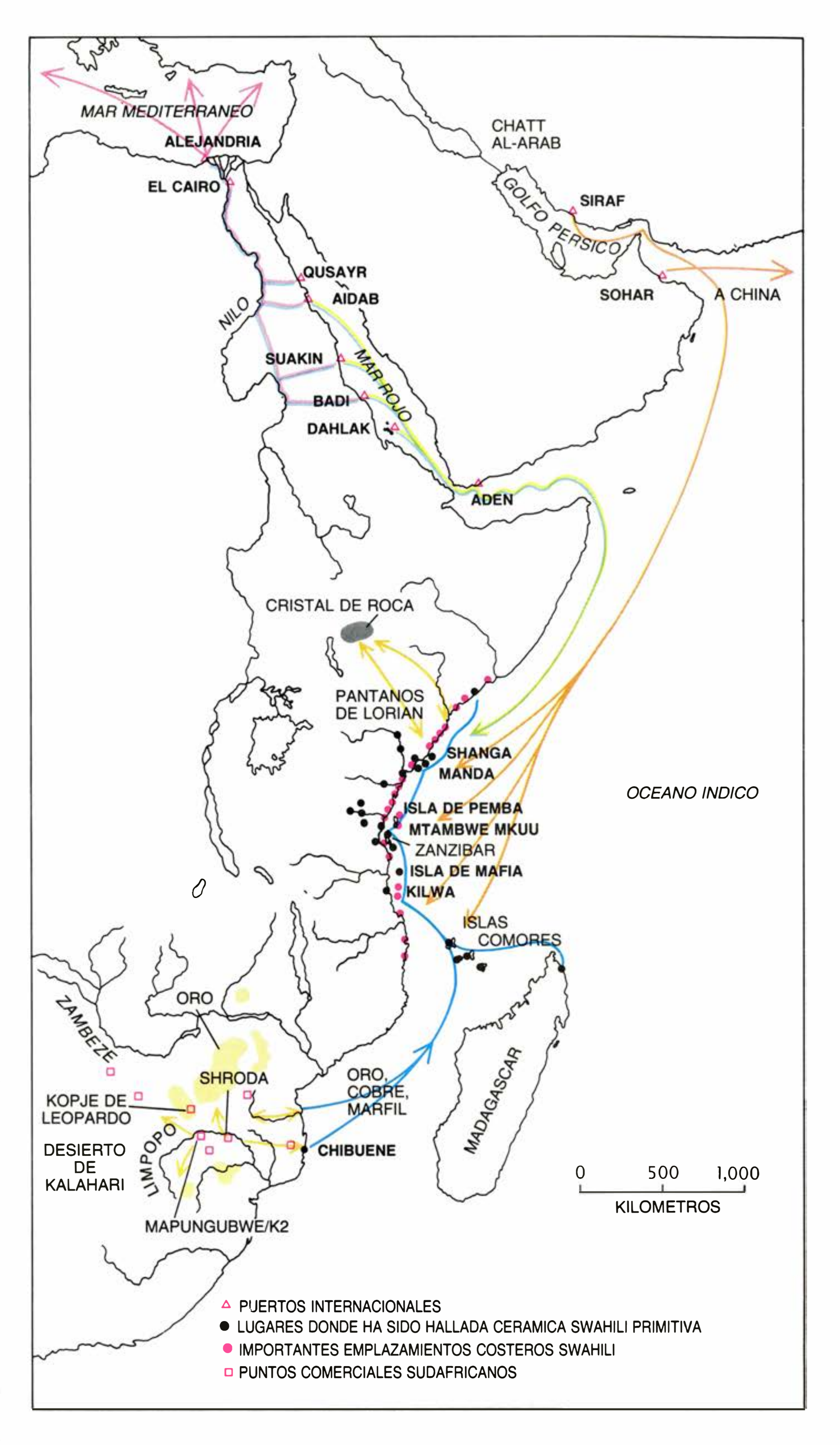
2. EL MTEPE era la embarcación usada por los mercaderes swahili; solía medir unos 15 metros de eslora y la vela era de estera de hoja de palma. El casco, de madera de teca africana, estaba perforada y trincada con bonote (cuerda de fibra de coco). La proa tiene la forma de cabeza de camello y las banderas simbolizan al sultán Alí de Shungwaya y a sus hijos. El diseño de la *mtepe*, que puede haberse creado en el siglo I d.C., se usaba durante los primeros años del XX.

Existen asentamientos de esta misma clase y época por todo el litoral del Africa Oriental, encontrándose el punto más septentrional en Mogadiscio, Somalia. Otros se hallan en el archipiélago Lamu (al cual pertenece la isla de Pate), dos en Zanzíbar y varios en islas al sur de Zanzíbar, inclusive la isla de Mafia, las islas Kilwa y las Comores. Los asentamientos más meridionales se hallan en la parte continental de Mozambique. Dichos emplazamientos definen la fase primitiva del Corredor swahili y tienen por denominador común la existencia de casas de barro y restos que indican una dieta de pescado y animales salvajes. La alfarería hallada es prácticamente idéntica en todos los yacimientos arqueológicos, lo cual parece indicar que se trataba de un solo grupo cultural que mantuvo contacto marítimo a lo largo de dilatados períodos de tiempo.

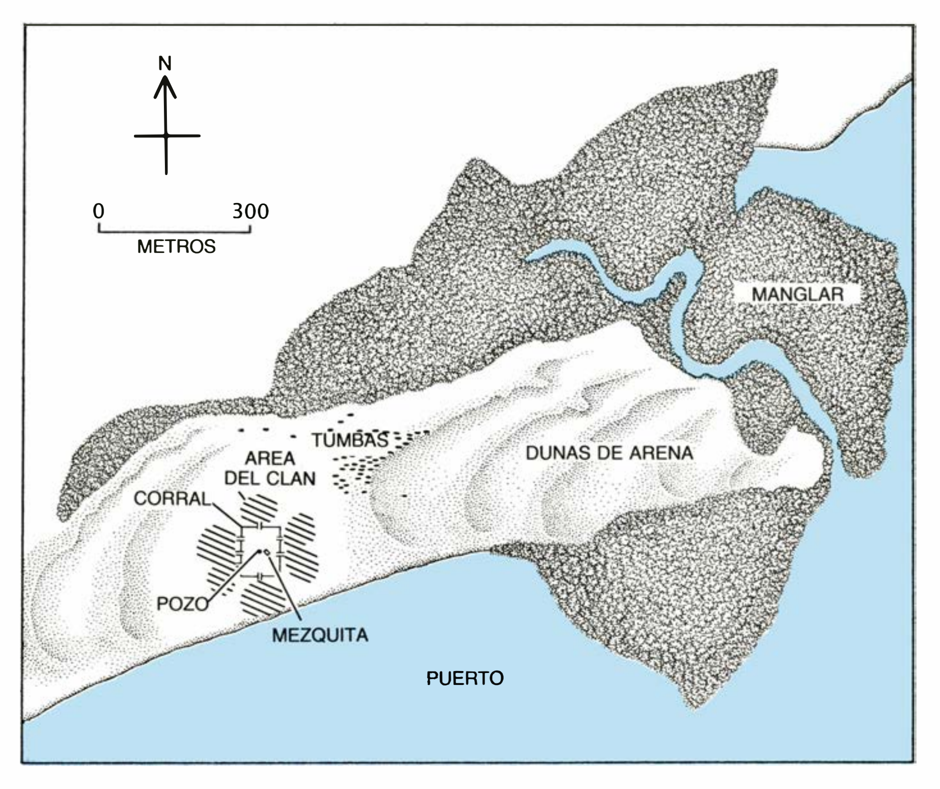
Esta sociedad marinera, unificada e indígena (cuya existencia ha sido reconocida hace sólo cinco años), puede haberse originado hacia el siglo I d.C., convirtiéndose, en el IX, en pieza integrante de una red comercial internacional. Sin embargo, esta red no era la que se extendía hacia el Mediterráneo, sino que constituía la ruta hacia China a través del golfo Pérsico.

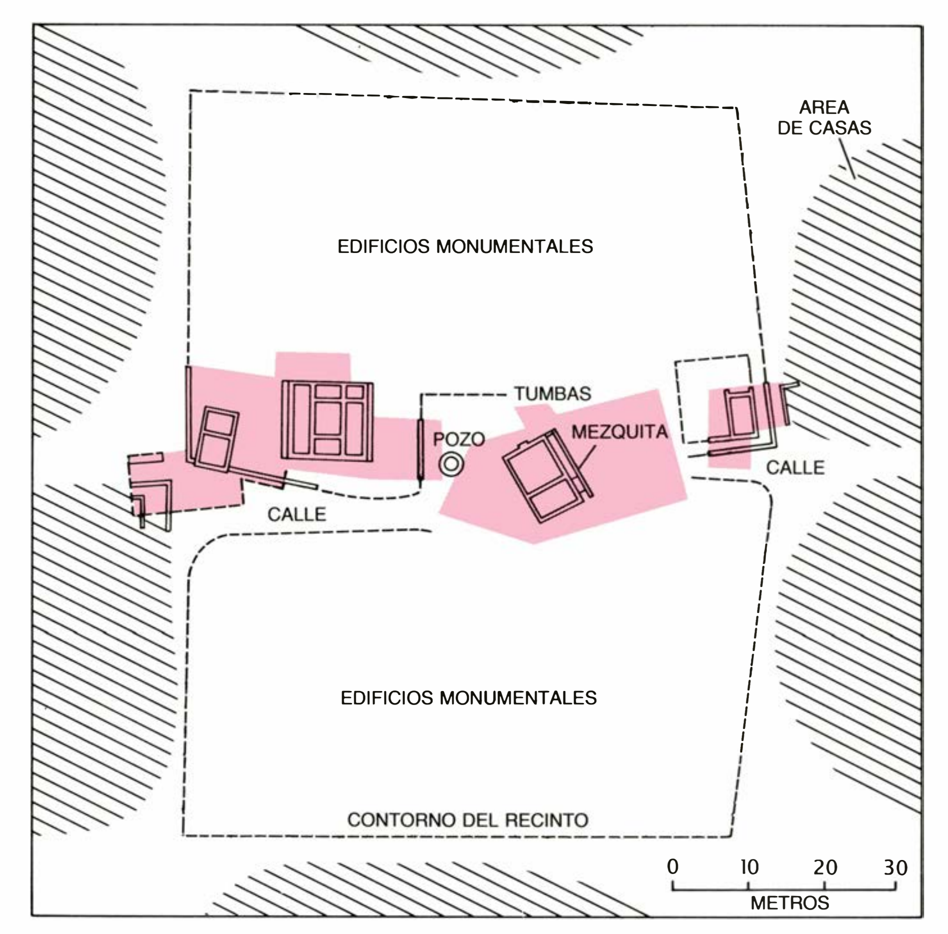
Entre los puertos principales del golfo Pérsico se encontraban Siraf y Sohar, cuyos mercaderes aprovecharon las posibilidades que les ofrecía la costa africana oriental para el establecimiento de un sistema comercial que se extendía hasta Oriente Medio y China. Una de las exportaciones africanas a China la constituía el marfil y el ámbar gris (sustancia cerosa que se creía procedente del intestino del cachalote y que se usa como fijador para los perfumes). La mayor parte de los productos, como la madera y los esclavos, se transportaban a Oriente Medio. La madera de los bosques del Africa Oriental techaba grandes ciudades del Oriente Medio, quizás incluso Bagdad. Los esclavos desaguaban las ciénagas del Chatt al-Arab en el Eufrates. El viaje de regreso traía a Africa objetos de gres de la dinastía T'ang: hasta un 5 por ciento de la cerámica hallada en yacimientos swahili lo comprenden las lozas procedentes del golfo Pérsico.

A comienzos del siglo X la red comercial, que tenía como eje el golfo Pérsico, decayó. La revuelta Zanj, rebelión masiva de esclavos africanos en Mesopotamia a finales del siglo IX, disminuyó el comercio africano.



3. EL CORREDOR SWAHILI se extiende a lo largo de 3000 kilómetros del litoral del Africa Oriental. Este corredor aparece punteado por emplazamientos costeros swahili (*puntos coloreados*); en muchos de estos lugares se ha encontrado cerámica swahili primitiva (*puntos negros*). Los mercaderes del golfo Pérsico establecieron una ruta que unía Africa Oriental y China en el siglo VIII (*naranja*). Ya en el siglo X otros mercaderes musulmanes del mar Rojo sustituyeron a los anteriores y crearon una ruta que conectaba el Africa Oriental y el Mediterráneo. El cristal de roca (cuarzo transparente), el oro y el marfil fueron transportados hasta la costa desde el interior a lo largo de unas rutas comerciales determinadas (*amarillo*). Los swahili adquirían estas mercancías en los puertos del litoral y se embarcaban rumbo al norte (*azul*) donde vendían estos preciosos materiales a los mercaderes del mar Rojo, los cuales regresaban a sus tierras con ellos (*verde*). Después de esa larga serie de trueques, las mercancías llegaban a sus puntos de destino en el Mediterráneo.





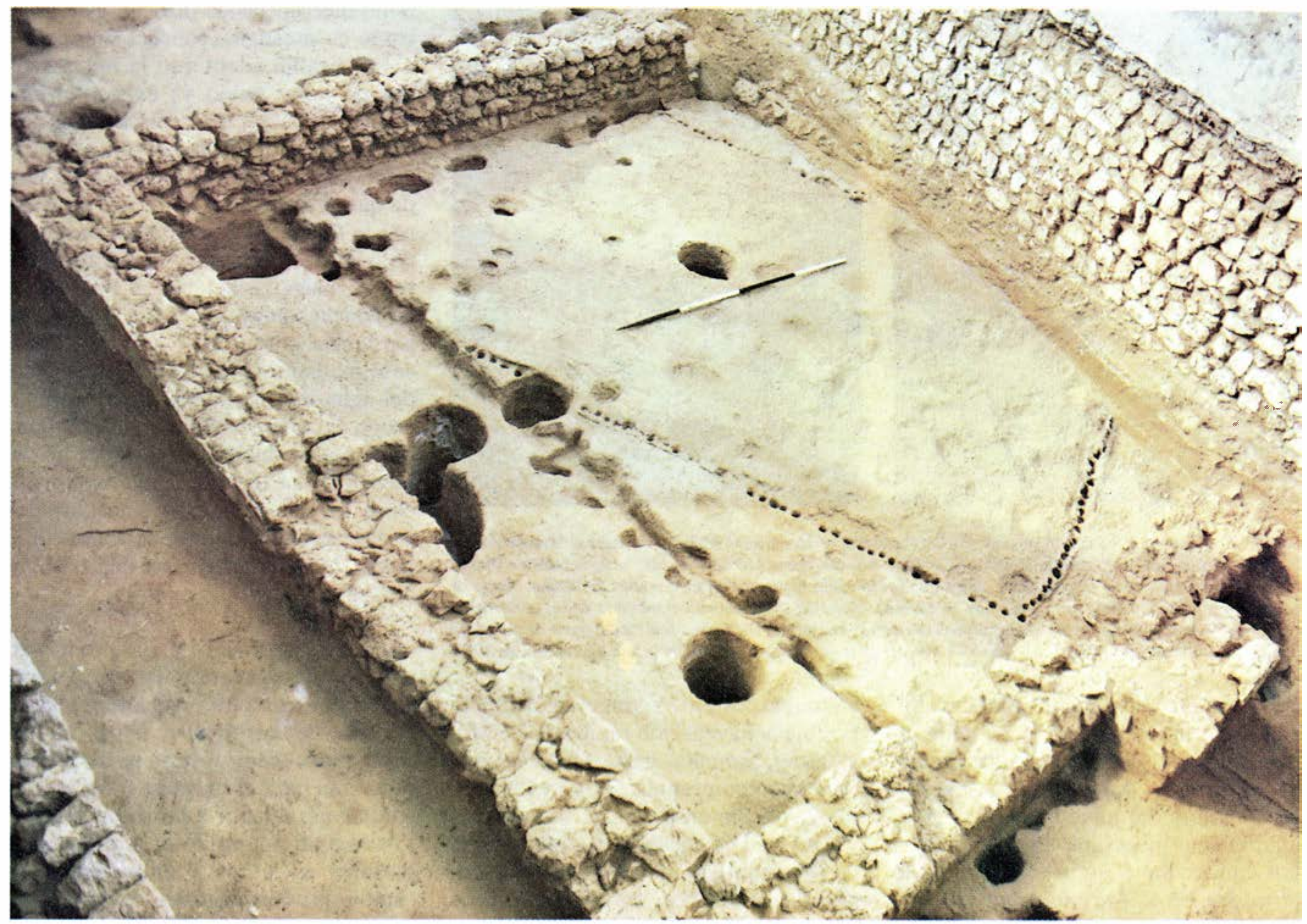
4. SHANGA, típico asentamiento swahili que se halla en la isla Pate, en la costa de Kenya. Las excavaciones realizadas por el autor sacaron a la luz 25 horizontes de ocupación, desde el siglo VIII hasta el XIV. Los horizontes primitivos muestran que Shanga era una comunidad de la edad de Hierro africana (*ilustración superior*). Las chozas, revestidas de barro, se agrupaban en áreas según los clanes y estaban situadas alrededor de un corral de ganado comunitario. Hacia el 800 d.C. se construyó en el corral la primera de varias mezquitas de madera halladas en el asentamiento. Hacia el 950 se levantó un complejo arquitectónico de piedra en el mismo lugar (*ilustración inferior*). Este nuevo conjunto arquitectónico contaba con una mezquita mayor de piedra y con un muro que se extendía a lo largo de lo que antes correspondiera al primitivo corral.

El comercio establecido entre Siraf y China, que constituía el mayor mercado para el marfil del Africa Oriental, disminuyó en gran manera durante el período de inestabilidad política que siguió al fin de la dinastía T'ang en el año 906. Este declive comercial lo refleja la arqueología de la costa oriental africana: se abandonaron muchos asentamientos primitivos porque no pudieron superar este golpe.

Al quedar libre la ruta marítima, los mercaderes del mar Rojo y del golfo de Adén, que tenían más contactos con el Mediterráneo que con China, creyeron necesario establecer relaciones permanentes con los gobernantes swahili del litoral. A fin de cimentar muchos lazos, ofrecieron, aparte de prosperidad, un conjunto de estilos artísticos y culturales, a la vez que artesanos competentes que pusieran dichos estilos en práctica. Todo ello dio como resultado un nuevo modo de vida en la costa oriental africana que remedaba al de las costas musulmanas del Oriente Medio y que fue adoptado por los gobernantes swahili que entraron en contacto con los mercaderes del mar Rojo.

El surgimiento de esta nueva prosperidad y el modo de vida que conllevaba apareció reflejado por vez primera en la excavación que yo llevé a cabo en Shanga: un conjunto de edificaciones de piedra monumentales que yacía directamente encima de los restos del corral derruido. El complejo de piedra fue erigido hacia el 950 y poseía muros de coral revestidos de yeso de cal de alta calidad. A los edificios, de gran magnitud, se accedía mediante escalinatas de piedra y estaban rodeados por un muro de piedra que seguía el tramo ocupado por el corral de ganado del siglo VIII. En el centro del conjunto se hallaba una pequeña mezquita de piedra que podría albergar a unas 40 personas únicamente; dicha mezquita de piedra es la más primitiva conocida del Africa subsahariana.

Este conjunto arquitectónico de piedra nos viene a indicar que tuvo lugar un cambio radical en el modo de vida de la Shanga de mediados del siglo X: ciertamente, este emplazamiento recuerda mucho a un palacio real. Tal como muestra el hallazgo de tres primitivas mezquitas de madera, habría existido una élite musulmana en Shanga en el siglo IX. Los nuevos edificios son, sin embargo, de escala mucho mayor. El muro que rodea la mezquita central, así como esta última y los edificios de piedra colindantes, nos parecen indicar que son el resultado de un



5. EXCAVACIONES EN SHANGA: revelaron la existencia de agujeros para postes que apuntalaron tres mezquitas de madera sucesivas (la más primitiva es del 800 d.C.) y que se encontraron bajo otras dos construidas en piedra; el rectángulo formado por agujeros pequeños pertenece a la primera mezquita de madera; la zanja lineal punteada por agujeros medianos, a la segunda; los agujeros de postes mayores, a la tercera mezquita. Los cimientos que aparecen en primer término pertenecen a la primera mezquita de piedra, construida en el siglo x; la pared que se encuentra al fondo es de la segunda, levantada en el XI.

alarde de riqueza y poder por parte del próspero nuevo grupo gobernante. El hecho de que el muro se extendiera a lo largo de lo que en su día fuera el primitivo corral de ganado parece indicarnos que el nuevo modo de vida fue adoptado por los indígenas y no impuesto desde el exterior.

Al igual que la unificada cultura marinera, dicho nuevo sistema de vida no se limitaba a Shanga, ya que, por ejemplo, en el vecino yacimiento de Manda podemos hallar edificios similares, tanto de piedra como de ladrillo, circundados por un recinto que data del 950 aproximadamente. Se han encontrado edificios de piedra y ladrillo de fechas similares también en Ungwana, en la Kenya continental. Una casa de este tipo se conserva en la superficie de la isla de Mafia y en Kilwa hay varias casas de piedra que datan de los siglos x y XI, excavadas por Neville Chittick, del Instituto Británico en Africa Oriental. En todos esos emplazamientos parece haber existido una autoridad centralizada que mantenía contacto con los traficantes y mercaderes.

Sostengo que, casi con toda seguridad, dichos cambios se produjeron como resultado del contacto existente con los mercaderes del mar Rojo y, por su mediación, el establecido con el mundo mediterráneo. Una de las pruebas principales que apoyan mi hipótesis la constituyen las técnicas utilizadas en la construcción de nuevos edificios: sus paredes eran de coral de alta mar, suministrado por buceadores, y trabajado antes de que se endureciera. Dicha construcción es característica de las ciudades del litoral del mar Rojo y ciertamente tal tipo de técnicas no fueron empleadas en puertos como Suakios, en la costa sudanesa, hasta hace relativamente poco tiempo. Parece ser que dichas técnicas evolucionaron durante el siglo x en las islas Dahlak y en emplazamientos como Er Rih, cerca de Suakin. Estas eran transmitidas rápidamente desde el sur del mar Rojo al Africa Oriental, con el fin de enriquecer las cortes de los gobernantes del Corredor swahili.

De todas maneras, es el alma del comercio y no los materiales de construcción la innegable evidencia: el dinero. En Mtambwe Mkuu, un emplazamiento del siglo XI de la isla de Pemba, hallé un tesoro de monedas de oro y plata. Había más de dos mil en el interior de un morral de tela con cierre de plata que estaba enterrado en una modesta casa de madera. Según Helen Brown, del Museo Ashmoleano de Arte y Arqueología de Oxford, el tesoro fue enterrado después de 1066, la fecha de la moneda más moderna. Aunque la mayor parte del tesoro está formada por monedas de plata, hay diez de oro de las cuales siete son dinares fatimíes procedentes de las cecas mediterráneas. Las otras tres son imitaciones de las monedas fatimíes, que ostentan una escritura arábiga simulada; dichas imitaciones pueden haberse acuñado en el Africa Oriental. De esta forma, las monedas de oro evidencian la directa relación con el Mediterráneo.

Esta relación la corroboran, a su vez, las monedas de plata, que son tan finas y pequeñas como el papel de estaño. Eran acuñadas localmente, tal como lo demuestran los nombres de los gober-




6. LAS MONEDAS DE PLATA nos revelan la relación existente entre el Africa Oriental y el Mediterráneo. La moneda es diminuta: 11 milímetros de diámetro. Aunque fuera acuñada en Africa, es del mismo tipo de monedas procedentes de las cecas sicilianas que los fatimíes (soberanos musulmanes de Sicilia, Norte de Africa y Egipto) controlaban. La cara de la moneda (*derecha*) lleva inscrito el nombre de un gobernante swahili, y la cruz, una máxima que rima con el nombre del anterior. Dicha moneda forma parte de un tesoro de unas dos mil piezas hallado en Mtambwe Mkuu, un asentamiento swahili de la isla de Pemba, en 1984.

nantes africanos grabados en ellas. Sin embargo, su diseño está claramente influenciado por el musulmán mediterráneo: el nombre del gobernante aparece en la cara de la moneda y, en la cruz, una máxima que rima con el nombre. Las únicas monedas de similar estilo proceden de la Sicilia fatimí del siglo XI. Aún más: cinco monedas fatimíes legítimas fueron encontradas en Manda. Parece ser que los gobernantes swahili del archipiélago Lamu, en 950, poseían monedas mediterráneas y las usaban como modelos para acuñar las suyas propias.

¿Por qué querían los swahili emular a sus contemporáneos mediterráneos? La respuesta a esta pregunta quizá radique en la conversión al islam por parte de este pueblo africano de la costa, ya que la protección ritual de una religión universal no era un factor a ignorar para una región en la que la magia constituía un potente aspecto de la autoridad. Los swahili pueden haber conseguido por medio de la religión recién adquirida una igualdad ritual con sus contactos comerciales, ya que un código compartido, religioso (y moral), pudiera haber incrementado la seguridad de las transacciones comerciales, hecho que suponía una ventaja para ambas partes. Estos beneficios de carácter inmaterial de los swahili podrían haberse visto reforzados con dinero e innovaciones culturales como las nuevas técnicas de construcción.

¿Qué podían ofrecer los swahili a los internacionales mercaderes musulmanes? En primer lugar, un dominio del comercio costero. Ya en el siglo VIII era posible la navegación rápida desde Mogadiscio, Somalia, hasta Mozambique, ruta que comprendía unos tres mil kilómetros. Sin embargo, el corredor no era de fácil navegación, ya que el canal de Mozambique, que separa Madagascar del continente, es peligroso, pues los monzones estacionales son imprevisibles en el sur ecuatorial. Todo ello originó una demanda de expertos navegantes como los swahili, marinos que se adentraban por el corredor en sus embarcaciones de teca, cuyas velas eran de estera de fibra de coco, transportando las mercancías hacia los grandes centros comerciales. Una vez allí, los mercaderes árabes cargaban los productos en *dhows* de alta mar y emprendían camino de regreso al mar Rojo.

Mas la destreza náutica de los swahili debía su reconocimiento al hecho de que dicho pueblo transportaba aquellas mercancías que otros requerían. El problema al que se enfrentaban los swahili era la obtención de tales bienes: oro, marfil y cristal de roca del interior. Para ello llevaron a cabo un sistema de intercambio a larga distancia que ya existía en el Africa de la edad de Piedra, al sur del Sahara. Estos tipos de intercambio, de origen absolutamente indígena, se utilizaban para redistribuir materiales tan escasos de por sí como la sal. Gracias a ello, otros grupos, como los cazadores, pastores y campesinos que tendían a un modo de vida diferente, adquirían los productos elaborados lejos. El comercio abarcaba tanto mercancías de primera necesidad como de prestigio (conchas marinas).

Los swahili adoptaron la red comercial de intercambio ya existente, ampliándola para cubrir sus propias necesidades, y, al ejercer su control sobre el suministro de mercancías en demanda que provenían del interior, obtuvieron la fiable colaboración de un grupo de colegas mercantiles de tierra adentro. Consiguieron tener el monopolio de conchas marinas, caurís y conos en particular, controlando a su vez el proceso mediante el cual se obtiene la sal del agua marina. Entre ellos había un grupo experto en herrería que suministraba sus productos a grupos que no conocían dicha técnica. El ganado e incluso los camellos eran transportados en las embarcaciones de teca, así como la tela de algodón africano o la seda importada.

Ante lo preciado de sus productos, los swahili consiguieron tejer una red de intercambio con el interior. Pero ellos no se introducían jamás en esa zona; antes bien, y según se desprende de la ruta para el suministro del marfil, confiaban tal labor a las tribus locales. Los swahili adquirían el marfil de los pastores en la costa, entregándoles a cambio productos acabados: principalmente ropa. La relación establecida entre los swahili y los pastores no se basaba únicamente en el comercio, sino también en la ayuda militar y, por parte musulmana, en el ofrecimiento de la magia y "protección" religiosa.

Los swahili recibían, pues, marfil de los pastores, quienes, a su vez, lo obtenían de un tercer eslabón de la cadena: los pueblos cazadores. Según algunas tradiciones, los cazadores daban uno de cada par de colmillos a los pastores en tributo y así podían vender el segundo libremente, cambiándolo por productos lácteos o hierro destinado a la fabricación de puntas de flecha. El marfil, en su totalidad, acababa por llegar a la costa tras esta complicada red de trueques comerciales. Una vez allí, los swahili lo adquirían y lo transportaban a sus ciudades, en donde lo vendían a los mercaderes extranjeros, obteniendo grandes ganancias en la operación.

El oro y el cristal de roca se conseguía de modo distinto. Según el reciente estudio de Richard Wilding, del Museo Nacional de Kenya, parece ser que el cristal procedía muy probablemente del sur de Etiopía, lugar en donde las condiciones geológicas son favorables para la formación de enormes piezas. El comercio del cristal del siglo X pa-

rece haber estado dirigido por pastores que pudieran ser parientes de los boro, habitantes todavía de la región. Estos pastores, nómadas, compraban artículos manufacturados que no podían conseguir en su tierra y, seguramente, reunían el cristal, llevándolo hasta la costa, con tal de cambiarlo por ropas y productos manufacturados.

Parece ser que, una vez en la costa, el cristal se tallaba antes de ser transportado, tal como demuestra la aparición de trozos de cristal de roca puro y cuentas parcialmente trabajadas desechadas, que se han encontrado en niveles arqueológicos del siglo x en los emplazamientos costeros del Africa Oriental. Las cuentas halladas eran, en su mayoría, las estropeadas o mal perforadas, y, por ende, desechadas. Su forma nos revela que los artesanos locales de la costa tallaban parcialmente los grandes trozos de cristal y que los desechos eran transformados en cuentas destinadas al comercio. El suministro de cristal de roca duró un siglo escaso, ya que en el 1050 este material había desaparecido por completo de los emplazamientos del litoral del archipiélago Lamu. Los talleres mediterráneos abandonaron la producción de cristal hacia esta época aproximadamente y comenzaron a usar sustitutos como el vidrio.

El cristal de roca llegó a la costa situada al norte inmediato de los principales puertos swahili. El caso del oro, sin embargo, representa más dificultades, ya que procedía de áreas al sur del continente y a las que se arribaba tras un largo viaje marítimo. El oro procedía del sur de Africa, de la región comprendida entre los ríos Zambeze y Limpopo, que ya había sido explotada desde épocas muy remotas. Roger Summers, del Museo Nacional de Rodesia, contó en 1969 hasta un total de más de mil puntos donde se hallaban trabajos de minería, túneles y pozos que conducían a los yacimientos auríferos. Aunque no se puede precisar la fecha del beneficio, algunas labores podrían ser contemporáneas de la cerámica correspondiente a la edad de Hierro del siglo I d.C. Tal como indican las pocas pruebas con carbono 14, el oro llevaba explotándose desde mucho antes de la llegada de los portugueses a finales del siglo xv.

Como resultado de su estudio, Summers concluyó que a lo largo de ochocientos años se extrajeron de la antigua Africa del Sur unos veinte millones de onzas de oro, por lo que podríamos calcular que más de veinte mil onzas eran extraídas anualmente, hecho que sin duda habría tenido gran impacto en la economía mundial. A la vista de tales cifras, no es de extrañar que los swahili centraran sus esfuerzos en el mercado del oro.

El litoral sudafricano marcaba el límite del Corredor swahili. Era allí donde los mercaderes que venían del norte conseguían marfil, aparte del oro, tal como indican recientes hallazgos. Un puerto swahili bien conocido de la costa sudafricana es Chibuene, en el cual Paul Sinclair llevó a cabo unas excavaciones para la universidad mozambiqueña Eduardo Mondlane. Chibuene no era un asentamiento permanente sino temporal; los mercaderes swahili entraban allí en contacto con los del lejano interior. La unidad cultural que caracteriza a toda la zona del corredor parece demostrar que la cerámica hallada en Chibuene, a dos mil quinientos kilómetros de Shangan, la alfarería local y las jarras y cuencos de la zona importados, son idénticos a los desenterrados en el archipiélago de Lamu.

Las rutas comerciales se adentraban



7. ENTRE LAS MONEDAS DE ORO DE MTAMBWE MKUU se encuentran dinares fatimíes, así como imitaciones de éstos de probable origen africano. El dinar era la unidad monetaria principal del mundo islámico. Las monedas que aparecen en las hileras superiores proceden de las cecas fatimíes de Túnez, Egipto, Damasco y Tiro. Las de la hilera inferior son imitaciones que quizás encargaran los gobernantes swahili para emular a sus réplicas mediterráneas.

por el interior hasta los yacimientos auríferos y las manadas de elefantes, desde puertos como Chibuene. Se han descubierto recientemente rutas interiores que se extendían a lo largo de mil kilómetros, desde la costa hasta el desierto de Kalahari, donde los cazadores San intercambiaban marfil por cuentas de vidrio, comercio que había comenzado en el siglo VII, aunque las vetas más ricas fueron descubiertas más tarde. En Shroda, y en un yacimiento denominado K2, que la prueba del carbono 14 ha datado como del 960, se han hallado grandes cantidades de cuentas de vidrio y desechos de marfil tallados. Cerca de Mapungubwe se encontraron ricos restos funerarios reales; en uno de ellos, un espectacular rinoceronte de oro. Tamaña riqueza indica que su localización se hallaba en la franja sur del continente, donde se encontraban los campos auríferos y, por tanto, éste era un buen punto para ejercer el control del comercio establecido con la costa.

Si consideramos los caminos por donde llegaban el oro, el cristal de roca y el marfil, nos haremos una idea clara de la ruta comercial que iba desde el sur de Africa hasta Sicilia, y más lejos aún. Dicha red comercial, en su totalidad, se desarrolló rápidamente durante la segunda mitad del siglo X, hasta bien entrado el siglo XVI. Sin embargo, el establecimiento de dicho sistema, y su complejidad, parece exigir algo más que la nueva demanda de estos materiales por parte europea: la demanda local y la organización social tenían su importancia. Los swahili comerciaban ya en el litoral, el oro era extraído en el sur de Africa y los sistemas de intercambio indígenas estaban bien asentados. La ruta mediterránea supuso, por tanto, la conexión de todos estos componentes.

El problema principal al que se enfrenta un arqueólogo o un historiador es el de contestar a la pregunta de si estas conexiones fueron fortuitas o se debieron a la iniciativa de uno de los grupos integrantes de la red. Parece improbable que una ruta tan vasta y arriesgada se estableciera por casualidad. Los datos que poseemos abonan, por contra, que sólo había un grupo capaz de valorar los grandes beneficios de dicho comercio, y el único que tenía contactos desde el Mediterráneo hasta el sur de Africa: los swahili. Debemos, por tanto, creer que el primer florecimiento de la cultura medieval europea se basó en la destreza de los navegantes del Corredor swahili.

Cómo aprenden las palabras los niños

Los diccionarios suelen ocasionar interpretaciones erróneas, mientras que las imágenes interactivas de vídeo movilizan la capacidad natural para aprender a partir del contexto

George A. Miller y Patricia M. Gildea

Cuando se escucha al niño que está aprendiendo a hablar, lo que más destaca es su limitado dominio del lenguaje. Tiéndese a pasar por alto la auténtica grandeza de la hazaña que realiza: el mero aprendizaje del vocabulario es ya una empresa colosal. Lo cierto es que, desde que empieza a hablar, va aprendiendo palabras nuevas a una velocidad de más de diez por día. Sin embargo, se conocen mal los mecanismos de ese logro. Por supuesto, no lo hace memorizando entradas de diccionario. Nuestras averiguaciones, y las de otros especialistas, sugieren que remitir a los niños al diccionario para desarrollar su vocabulario resulta menos eficaz de lo que cree la mayoría de los padres y educadores. Estamos investigando la posibilidad de que para ese propósito resulte mejor un programa de ordenador que brinde información léxica sobre los nuevos términos que aparezcan en el contexto de un relato.

Cuando los adultos se ponen a aprender un nuevo idioma conocen cuál es la tarea que les aguarda: habrán de aprender una nueva pronunciación, una nueva gramática, un nuevo vocabulario y un nuevo estilo de usar el lenguaje. Saben que tendrán que dedicarle a la tarea varias horas al día durante años para considerar que dominan con fluidez la nueva lengua. Y saben también que podrán contar con la ayuda de profesores y expertos que les explicarán, en su primer idioma, cuanto hayan de aprender sobre el segundo.

La situación de los niños es muy distinta: puesto que carecen de lenguaje, no se les puede decir lo que necesitan aprender. Ello no obstante, hacia los tres años suelen haber aprendido la estructura básica de su idioma y se encaminan hacia la adquisición de una buena capacidad de comunicación. Para muchos, la adquisición de la primera lengua constituye la mayor hazaña intelectual que realizarán en toda la vida.

Los especialistas en aprendizaje del habla suelen considerar la rápida adquisición de la gramática como el aspecto más notable del proceso. Sin embargo, la capacidad de los niños para adaptarse a las reglas gramaticales no resulta mucho más maravillosa que su sorprendente capacidad de aprender vocablos nuevos.

¿Cuántas palabras hay que conocer para poder comunicarse en español? La respuesta depende de muchas variables, incluida lo que se quiera entender por "palabra". A efectos de cómputo, puede definirse la palabra como el tipo de unidad léxica que debe aprenderse; todas las formas derivadas y compuestas que resulten ser meras variaciones morfológicas sobre un mismo tema conceptual no se contarán como palabras distintas. Por ejemplo, *escribir* es un vocablo; sus variantes morfológicas (*escribe, escriben, escribió, escrito, escritura, escritor*, etcétera) son parientes de la misma familia. Si la familia entera se cuenta como un solo vocablo y el conocimiento de una palabra se define como la capacidad de reconocer, entre cuatro definiciones, la que más se aproxima a su significado, entonces el vocabulario de lectura de un bachiller superior, por ejemplo, constará de alrededor de unas 40.000 palabras. Si se consideran también palabras todos los nombres propios de personas y lugares y todas las expresiones idiomáticas, deberá doblarse esa cantidad.

La cifra habla por sí sola de la capacidad infantil de aprendizaje del vocabulario. Si el bachiller promedio cuenta 17 años de edad, esas 80.000 palabras se habrán aprendido en 16 años, por lo que el infante promedio aprende a razón de 5000 palabras por año, es decir, 13 diarias. Los niños que posean un vocabulario más rico probablemente dupliquen ese ritmo. Está claro que en el niño normal se registra un proceso rápido y muy complejo de aprendizaje.

Nadie les enseña diariamente a los niños 13 o más palabras. Deben poseer un talento especial para ese tipo de aprendizaje. Hace una década, Susan Carey y Elsa J. Bartlett, a la sazón en la Universidad de Rockefeller, descubrieron valiosos indicios del mecanismo de ese proceso. Trabajaban con nombres de colores. Primero se aseguraron de que un grupo de niños de tres años de edad desconocía el color oliva. La mayoría lo llamaba verde; marrón, el resto.

Carey y Bartlett les enseñaron un nombre sin sentido para designar el color oliva —un nombre que los niños no habrían oído antes. Eligieron para la prueba dos bandejas, que pintaron una de color oliva y la otra de azul. En el ensayo se le decía a cada niño, con toda naturalidad: "Dame la bandeja *cromada*; no la azul, la *cromada*". El niño solía vacilar, señalando quizá la bandeja oliva. "¿Esta?" "Sí, ésa. Gracias."

Una semana después, sin ninguna orientación más, se les preguntaba de nuevo los nombres de los colores. Al presentárseles el oliva, vacilaron; no recordaban que fuera *cromado*, pero sabían ya que no se llamaba verde ni marrón. Una sola exposición había bastado para que empezasen a reorganizar su léxico de los colores.

Este sencillo experimento demostró algunos extremos importantes acerca del aprendizaje del vocabulario por parte de los niños. En primer lugar, para aprender un vocablo el niño ha de

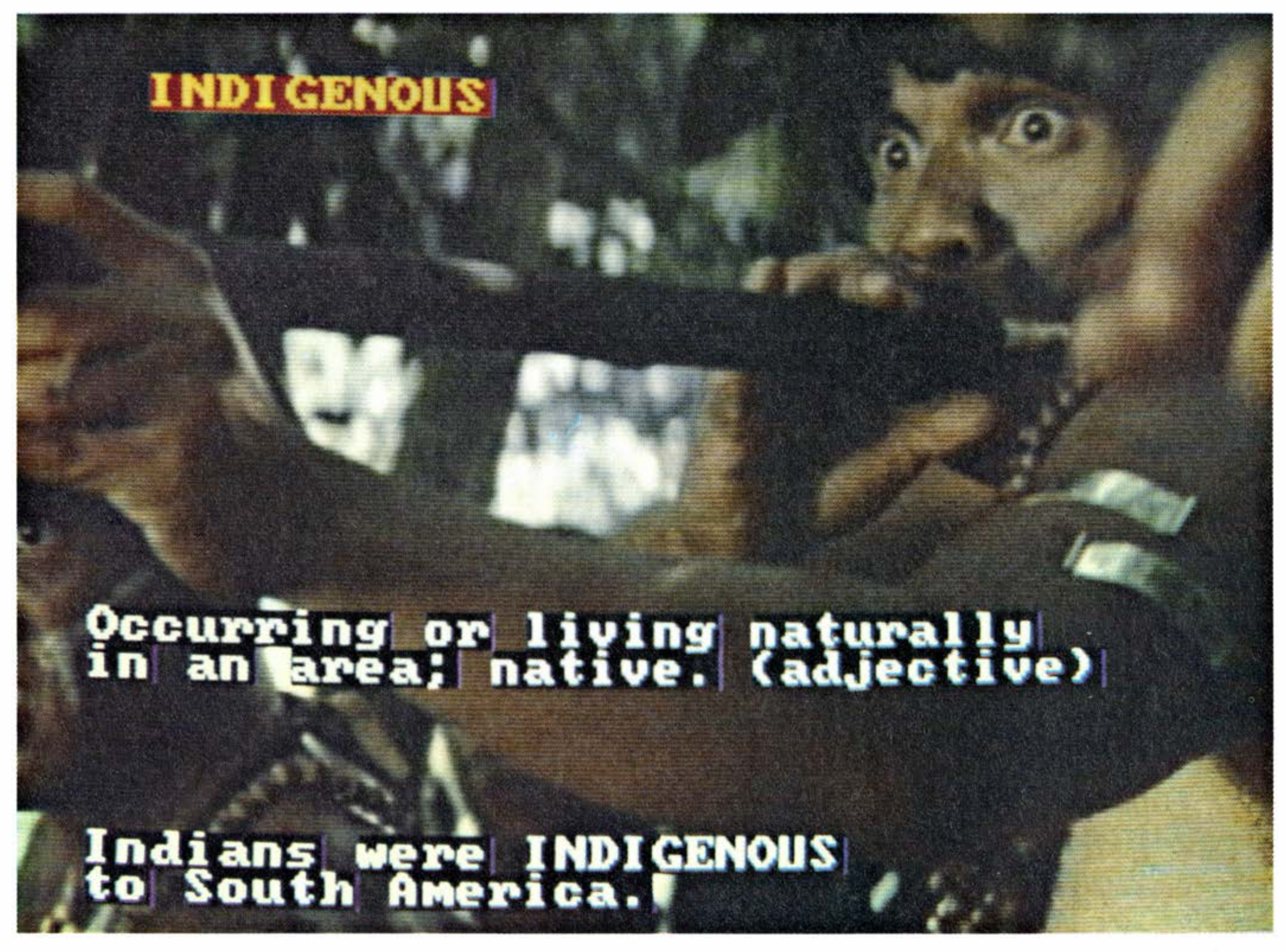
asociar su sonido con su significado. El dominio de la pronunciación y del reconocimiento de una palabra y el apoderarse del concepto que expresa son procesos de aprendizaje distintos. Después de su experiencia con las bandejas, los niños sabían que el color oliva tenía una designación propia, es decir, que no se llamaba verde ni marrón, pero no recordaban el sonido verbal particular que iba asociado a la percepción de ese color. Para que el sonido de una palabra nueva resulte familiar, quizá tenga que repetirse muchas veces.

En segundo lugar, la apreciación del significado de un vocablo por el niño parece producirse en dos fases, una rápida y otra mucho más lenta. Los niños advierten de inmediato si una palabra es nueva y la asignan a una categoría semántica amplia. Al oír *cromada*, los pequeños de tres años la asignaron al campo semántico de los nombres de los colores. Los infantes distinguen esos campos antes incluso de conocer lo que significa cada palabra por separado. Preguntados por el color de algo, puede que respondan con un color cualquiera, pero nunca contestan *redondo*, *cinco* o *comida*.

La fase lenta es la de elaboración de las distinciones entre los vocablos de una misma categoría semántica. Tras asignar correctamente *rojo, verde, amarillo* y *azul* al campo semántico de los términos que designan colores, el niño ha de aprender las diferencias y las relaciones que existen entre esas palabras. De ordinario, esta fase es mucho más larga que la anterior, y puede que no concluya nunca; algunos adultos, por ejemplo, asignan correctamente los términos *altarreina* y *calceolaria* al campo semántico de los nombres de las plantas con flor, pero no han aprendido qué plantas denotan esos vocablos ni las distinguen cuando las ven. En cualquier momento suelen encontrarse muchos términos en ese estado intermedio, en el que se conocen y están categorizados, pero aún no se distinguen unos de otros.

Un aspecto afín del aprendizaje de palabras por los preescolares, que ha atraído bastante la atención, es el de la denominada "sobreextensión". Por ejemplo, un párvulo que esté aprendiendo la palabra *manzana* puede aplicársela a un tomate si cree que *manzana* significa "redondo-rojo-y de cierto tamaño"; sin ulterior calificación, esos atributos definen a los tomates maduros tanto como a las manzanas maduras. Puede producirse sobreextensión cuando el niño conceptúa de modo incompleto el significado de un vocablo.

También se da a veces el error opuesto, que sólo se descubre mediante un interrogatorio especial. Por ejemplo, el niño que crea que ser redondo, rojo y de cierto tamaño define a la *manzana* quizá no use *manzana* para referirse a ejemplares de esa fruta que



1. ASESORAMIENTO INFORMATIZADO que, según están evaluando los autores, aventaja a los diccionarios a la hora de que los niños capten el significado de un vocablo que no les resulta familiar. Los niños leen un texto donde se describe algún episodio de una película que acaba de mostrárseles, en este caso *Los ladrones del arca perdida*. En el texto se marcan las palabras que deben aprender los alumnos, por ejemplo, *indígena*. En un dispositivo de vídeo los niños pueden recabar información sobre esa palabra en forma de definiciones, frases o imágenes, a elección. Se procura presentar la información cuando el niño está motivado para aprenderla y se destaca la acepción que se utiliza en el contexto donde la ha encontrado, superándose la ambigüedad y lentitud de los diccionarios.

sean verdes o amarillos. El único modo de identificar tal infraextensión es mostrarle manzanas verdes o amarillas y preguntarle cómo se llaman.

En años recientes, la capacidad de los preescolares para captar vocablos ha atraído cada vez más la atención. De ella se conoce hoy mucho más que lo que se sabía cuando Carey y Bartlett efectuaron su pionero estudio sobre los nombres de los colores. Pero el proceso de aprendizaje se complica todavía más durante los años escolares.

En los primeros grados de escolaridad se espera que los niños aprendan a leer y escribir. Primero leen y escriben palabras que les resultan familiares, por haberlas aprendido mediante la conversación. Luego empiezan a encontrarse con palabras escritas que no han oído. Llegados a ese punto, suele considerarse que la enseñanza de los términos no familiares exige alguna acción especial.

Esta suposición pedagógica tropieza con graves problemas. Aunque los niños son capaces de advertir que no han visto antes una palabra dada, el aprendizaje hasta reconocerla automáticamente y emplearla con corrección es un proceso lento. El aprendizaje de un nuevo vocablo requiere tal claridad conceptual y ejercicio fonológico que no hay horas de clase suficientes para enseñar de ese modo más de 100 o 200 palabras por año. El aprendizaje le saca tanta ventaja a la enseñanza (se aprenden unas 5000 palabras cada año y sólo se enseñan unas 200) que resulta difícil eludir la pregunta: ¿cómo se las arreglan los escolares para aprender mucho más de lo que se les enseña?

Muchas palabras se adquieren mediante la lectura. Los niños aprenden palabras en la escuela igual que en casa: observando cómo se utilizan en contextos inteligibles. La diferencia estriba en que el ambiente escolar se apoya más en contextos escritos. La opinión pública y las pruebas científicas coinciden en que el mejor modo de enriquecer el vocabulario de los escolares es que lean lo más posible.

Aprender palabras leyéndolas en un contexto es, sin duda, eficaz, pero no es lo más eficiente. Algunos contextos no informan y otros desorientan. Si la palabra en cuestión expresa un concepto no familiar, su uso en un solo contexto rara vez permitirá elaborar más de una hipótesis sobre su significado. Para que la lectura ejerza un efecto importante sobre la adquisición de vocabulario, debe leerse mucho.

¿Cuánto? Si el niño dedica 50 minutos de la jornada escolar a la lectura de 200 palabras por minuto, al cabo de un curso de 100 días lectivos habrá leído un millón de palabras. Un millón de palabras corrientes de prosa castellana quizá contengan unos 50.000 tipos de vocablos, que vienen a representar unas 10.000 familias de palabras. Los libros de texto probablemente incluyan menos palabras distintas. Pero aun aceptando esas 10.000, resulta poco verosímil que 1000 de ellas constituyan términos léxicos totalmente nuevos. Y puesto que el aprendizaje de un vocablo nuevo exige que aparezca repeti-



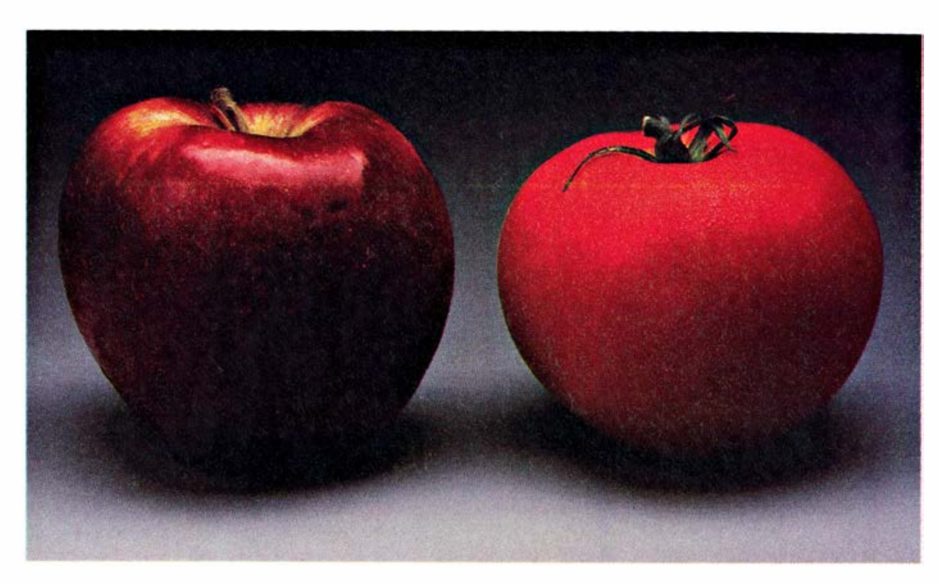
2. EXPERIMENTO DE LAS BANDEJAS, que demostró la rapidez con que los preescolares asignan a categorías semánticas las palabras que les resultan nuevas. Hace una década, Susan Carey y Elsa J. Bartlett, a la sazón en la Universidad de Rockefeller, tras asegurarse de que un grupo de niños de tres años desconocía el nombre para el color oliva, al que llamaban verde o marrón, les mostraron una bandeja pintada de azul y otra de oliva. Les pedían a cada uno que les dieran "la bandeja *cromada*, no la azul". Al cabo de una semana les preguntaban los nombres de aquellos colores y, si bien no recordaban la palabra *cromada*, sabían que el color de la bandeja no era el verde ni el marrón. Una sola presentación bastaba para que reorganizaran su campo semántico de los términos que designan colores, aunque se requieren varias para familiarizarse con el término. La fotografía representa una repetición del experimento original.

damente, está claro que la lectura de un millón de palabras al año resulta insuficiente. Para alcanzar el ritmo de incremento de 5000 palabras por año, parece necesario pensar en un aprendizaje continuo a partir de interacciones en la conversación, complementadas con la lectura de varios millones de términos al año. En efecto, los niños que leen poco fuera del aula suelen obtener notas bajas en las pruebas de vocabulario.

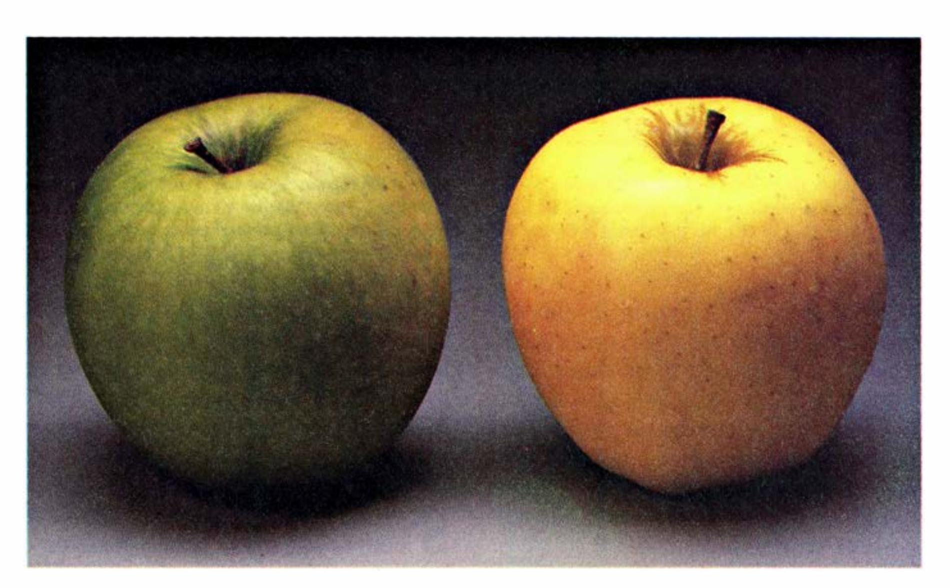
Que los niños aprendan muchas más palabras de las que nadie tiene tiempo de enseñarles influye también sobre el papel del instructor en el aprendizaje. Aprender vocablos nuevos a partir de contextos exclusivamente literarios —de contextos ofrecidos por el papel impreso— resulta más difícil que hacerlo mediante el trato personal. En la conversación suele poderse interrogar al interlocutor acerca del significado de una palabra. Es más, en la mayoría de las conversaciones la información lingüística se complementa con información visual-gestual, ayuda que no aporta el papel impreso.

Dada esa dificultad adicional, parece razonable pedirle a los maestros que ayuden a incrementar el rendimiento de los niños en el aprendizaje de nuevos vocablos a partir del contexto. Puesto que no les es posible enseñar todas las palabras que los niños necesitan saber, podrían ayudarles a resolver el problema por sí mismos.

Un modo de entender el significado de una palabra desconocida es utilizar el diccionario. Por eso, hacia los diez años de edad, en la mayoría de las escuelas empiezan a enseñarse las técnicas necesarias para la consulta: deletreo, alfabetización, pronunciación, partes de la oración y algo de etimología y morfología. El propósito, perfectamente razonable, es que los niños aprendan a encontrar en el diccionario las palabras que no conocen y a entender las definiciones.



3. SOBREEXTENSION en el uso de las palabras. Se produce entre los preescolares cuando su comprensión del significado de un término es incompleta. El niño cuya comprensión de *manzana* se limite a que se trata de un objeto redondo, rojo y de cierto tamaño quizá también llame manzana a un tomate, puesto que, sin más precisiones, esos atributos coinciden por igual en las manzanas maduras y en los tomates maduros.



4. INFRAEXTENSION, que se produce también entre los preescolares. El niño que cree que *manzana* corresponde a un objeto redondo, rojo y de cierto tamaño quizá no aplique ese término a las manzanas verdes o amarillas. Sólo se advierte ese error léxico al interrogar al niño acerca del nombre de esas manzanas.

Sin embargo, uno de los problemas de ese enfoque es que la mayoría de los niños sanos, bien dotados y bien intencionados, siente una fuerte aversión hacia los diccionarios, y quizá no les falte razón. Hemos examinado algunas de las tareas que los maestros les imponen para instruirles en el manejo de los diccionarios y, en nuestra opinión, tales ejercicios no merecen la confianza que pedagogos y padres les otorgan.

Suelen asignárseles con ese propósito dos tareas. Una consiste en deshacer ambigüedades: se le presenta al niño una frase que contiene un término ambiguo —una palabra de dos o más significados— y se le pide que la busque en el diccionario y decida en cuál de los significados de la palabra pensaba el autor de la frase. La otra requiere esfuerzo de producción: se le da al niño una palabra, se le pide que la busque en el dicionario y que escriba una frase que la incluya. A primera vista se diría que ambas tareas son instructivas; sorprende, por tanto, descubrir cuán ineficaces resultan.

El aprendizaje a partir de un diccionario es tarea harto compleja. Debe interrumpirse la lectura y buscar, en una relación ordenada alfabéticamente, una palabra cuyo sentido se desconoce, a la vez que se conserva en la mente el contexto original, para compararlo con las diversas acepciones que brinda el diccionario y elegir la que encaje mejor en él; todo ello constituye un esfuerzo de alto nivel cognitivo. A nadie extrañe que el rendimiento de los escolares sea pobre. Ni siquiera eliminando la mayoría de las complicaciones logran en ello los niños buenos resultados. En una tarea de rotura simplificada de la ambigüedad, en la que se presentó a escolares de nueve y diez años sólo dos significados y se les pidió que distinguieran el que se había empleado en una frase, los niños apenas lo hicieron mejor que si la despacharan al buen tuntún.

La segunda tarea, la de componer una frase que incluya la palabra nueva,

Los monos del parque son muy parientes

Para ir a caballo me subo en el revés de mi padre

La enmienda para ponerse bueno cuando estás enfermo es quedarse en la cama

Cada noche marro el dinero que guardo en la hucha

Esta noticia es muy dogma

5. FRASES DESCONCERTANTES que a menudo redactan los escolares cuando han captado de modo incompleto el sentido de una palabra que no les resulta familiar. Aquí, algunos ejemplos compuestos por niños de once y doce años de edad. La figura 6 revela lo que en realidad pretendían expresar los niños.

tiene la virtud de exigir al escolar que haga uso del vocablo y así, presumiblemente, piense en su significado. También la hemos estudiado con detenimiento. Tras la lectura de varios miles de frases escritas por niños de 11 y 12 años, hemos llegado a la conclusión de que esa tarea constituye también una pérdida de tiempo.

Un ejemplo típico de esas frases: "La señora Martínez provocó la sopa." Ilustra el error más frecuente que cometen los niños de esas edades. Si ya conocen la palabra, las frases suelen ser correctas; pero si la desconocen, los resultados son a menudo desconcertantes. Para comprender lo que han querido decir deben leerse detenidamente las mismas definiciones del diccionario que hayan consultado. En nuestro caso, el niño que consultó *provocar* había encontrado, entre sus acepciones, la de *agitar*.

El caso nos brinda una clave de lo que sucede cuando los niños consultan el diccionario. Al encontrar la voz que desconocen, buscan entre las definiciones algún término o alguna expresión que les resulte familiar. A continuación componen una frase utilizando la palabra o expresión conocidas, que sustituyen por la nueva. Uno de nuestros ejemplos favoritos es el de una niña de 11 años que, buscando el significado de la palabra *erosionar*, encontró los sinónimos *desgastar, gastar*, y pensó en la frase "Nuestra familia gasta mucho"; sustituyó *gasta* por *erosiona* y propuso: "Nuestra familia erosiona mucho."

Si los niños aprenden con facilidad nuevas palabras cuando las oyen o las ven usadas contextualmente, ¿por qué tropiezan con tantas dificultades para aprender otras nuevas del diccionario? Decidimos analizar en detalle lo que pasaba cuando se encuentra un vocablo desconocido en el contexto de una frase típica. En un primer estudio se comprobó que los niños redactaban frases mejores cuando se les proponía como modelo una que contuviera la palabra desconocida que cuando se les daba la definición del término. Puesto que muchas de las frases se redactaban a imitación de los modelos, el resultado no podía interpretarse como que los niños aprendieran más sobre el sentido de un término a partir de frases ilustrativas que lo que aprendían a partir de definiciones. Sin embargo, la observación, alentadora, nos indujo a proseguir las investigaciones.

El paso siguiente era sencillo: si un ejemplo daba buen resultado, tres lo darían mejor. Pero, una vez los hubimos comparado, advertimos que el número de ejemplos influía poco en la diferencia. Los índices de aceptabilidad de las frases compuestas después de leer un ejemplo coincidían con los de las frases escritas con tres ejemplos.

La observación nos obligó a plantearnos de nuevo el mecanismo del proceso. Al parecer, les costaba integrar tres frases no relacionadas entre sí, por lo que se limitaban a centrar la atención sobre uno de los ejemplos e ignoraban los demás; proceder semejante al que adoptan al leer las definiciones del diccionario.

Nos sorprendió uno de los resultados, si bien, visto en retrospectiva, teníamos que haberlo esperado: aparecían errores que semejaban simples sustituciones, y ello aunque se les presentara a los niños frases modelo en vez de definiciones de diccionario. Por ejemplo, ante la frase modelo "El hermano del rey trataba de usurpar el trono" para que definieran la palabra, desconocida para ellos, *usurpar*, los niños escribieron frases tales como "Usurparon la silla azul de la habitación", "No usurpeis la cinta de la tienda" o "El ladrón intentó usupar el dinero de la caja fuerte". Habían entendido, a partir de la frase modelo, que *usurpar* significaba *coger*, y sustituyeron ese verbo por *usurpar*.

Los niños deducen parte del significado de una palabra desconocida basándose en el contexto; por ejemplo, que en *usurpar* hay cierto componente de *coger*. Igual que el párvulo sobreextiende *manzana* porque conoce sólo parte de su significado, así se sobreextiende esa parcial definición de *usurpar*. Esto es, si *usurpar* se define incompletamente como *coger*, puede aplicarse a cualquier cosa susceptible de ser cogida: sillas, cintas, dinero, etcétera. Considerado en retrospectiva, el proceder de esos niños de 11 y 12 años no constituye sino un estadio posterior en el desarrollo del proceso de aprendizaje de una palabra por parte de los preescolares.

La estrategia de la sustitución parece ser, pues, bastante general. Pero en el contexto de una frase modelo aparece algo más que un simple error de sustitución. En una frase ilustrativa los niños no pueden buscar una palabra que les resulte familiar, como ocurría en la definición del diccionario. Primero han de abstraer del contexto de la palabra desconocida un concepto familiar; sólo después pueden aplicar la regla de la sustitución.

¿Existe algún modo mejor de fomen-

tar la riqueza de vocabulario? Nuestros hallazgos sobre el proceso de aprendizaje, y los de otros investigadores, respaldarían varias hipótesis plausibles. Considérese, ante todo, que el mejor aliado del maestro en esta empresa es la motivación del alumno para descubrir significados en los mensajes lingüísticos. Empezarán a comprenderse entonces los problemas que plantean los procedimientos de instrucción tradicionales. Los ejercicios a base de listas de términos preseleccionados arbitrariamente rara vez vez coinciden con un interés por parte del alumno sobre el significado de esos vocablos; no logran instar la motivación natural a aprender las asociaciones entre palabra y significado. El aprendizaje mediante la lectura plantea el problema opuesto: cuando el alumno se encuentra motivado a aprender su significado no se le ofrece suficiente información sobre el término.

Se necesita una lectura que suscite a los estudiantes la curiosidad por las palabras que desconocen, completada con una inmediata información sobre su significado y uso. Lo que importa es ofrecer la información cuando el lector aún la está deseando. Los diccionarios resultan demasiado lentos. El recurso al diccionario servirá de ayuda a un estudiante maduro y motivado, mas para el niño de grado elemental probablemente comporte la interrupción de la atención, sumada a una mala interpretación de la información. Un guía humano, alguien que de inmediato detecte y resuelva los errores léxicos de interpretación, resulta mucho más adecuado que el diccionario.

Dada la escasez de atentos asesores que puedan asistir a cada joven lector, cabe preguntarse qué porción de esa tarea de asesoramieto podría encomendarse a un ordenador convenientemente programado. Supóngase, por ejemplo, que al estudiante le presentase el material de lectura un ordenador programado para responder a preguntas sobre los significados de todas las palabras contenidas en ese material. No haría falta ya una búsqueda alfabética: sencillamente, el estudiante señalaría la palabra en cuestión y obtendría la información sobre ella. Tampoco se requerirían complejas desambiguaciones: el ordenador sabría de antemano cuál era el sentido del vocablo en ese contexto. En realidad, tampoco se precisaría definición; bastaría con expresar el significado de la palabra con otros términos para aclarar su sentido en ese contexto.

Imagínese, por ejemplo, cómo actuaría el ordenador en el caso de *erosionar* y *usurpar*. Podría mostrar un texto que presentara la frase "Sus últimas declaraciones a la televisión erosionaron la popularidad del presidente". Si el alumno pidiera información sobre *erosionar*, el ordenador respondería, por ejemplo: "Los materiales se erosionan; cuando la lluvia y el viento erosionan el terreno, se va rompiendo y poco a poco se deshace y desaparece. También del poder, o de la autoridad, se dice que se 'erosionan', es decir, que los van destruyendo lentamente circunstancias desfavorables. A esa erosión alude la frase sobre la popularidad del presidente."

Supóngase que para *usurpar* el ordenador presentara un texto con la frase "El hermano del rey fracasó en su intento de usurpar el trono". Al pedírsele información, el ordenador diría: "Se le usurpa un título, una tarea o un puesto a alguien si otro se lo quita sin tener derecho a ello. En la frase sobre el hermano del rey, *trono* no se refiere sólo al mueble sobre el que se sienta el rey, sino que simboliza también la autoridad real."

Las técnicas informáticas actuales han alcanzado ya un desarrollo suficiente para ofrecer tales explicaciones de modo casi instantáneo. Cabe, incluso, añadir una voz que pronuncie la palabra en cuestión, o mostrar imágenes que aclaren lo que significa esa palabra en el contexto.

Estamos explorando algunas de tales opciones con un grupo de niños, de 11 y 12 años, que interactúan con imágenes de vídeo. Se les pide que lean un texto que describe un episodio de una película que acaban de ver. En el texto aparecen marcadas algunas palabras, que el lector deberá aprender. Cuando aparece alguna, el niño puede pedir ayuda sobre su significado, que se le ofrece mediante definiciones, frases e imágenes, a su elección.

A algunos niños, las frases ilustrativas les informan mejor que las definiciones o las imágenes. Cuando a esos alumnos se les da una definición, la leen y de inmediato retoman el hilo del relato. Si se les ofrece una frase que resulta significativa para el relato y emplea el vocablo en el mismo contexto, la interpretan como si se tratara de un acertijo que deben resolver. Discurren durante más tiempo sobre el significado de la palabra, pero lo recuerdan mejor al cabo de una semana.

Según hemos comprobado, ofrecer la información cuando ésta se desea puede favorecer de modo significativo la captación de palabras no familiares por parte del niño, como lo demuestra su capacidad de reconocer su sentido y redactar frases aceptables que contengan esos vocablos. Resultados que refuerzan nuestra opinión de que los ordenadores pueden colaborar notablemente al enriquecimiento del vocabulario.

DEFINICION	SENTIDO EXTRACTADO	RESPUESTA
pariente 1. Dícese de cada uno de los ascendientes, descendientes y colaterales de su misma familia. 2. Allegado, semejante o parecido.	parecidos	Los monos del parque son muy parientes.
revés 1. Espalda o parte opuesta de una cosa.	espalda	Para ir a caballo me subo en el revés de mi padre.
enmienda Corrección, reparación de un error, remedio.	remedio	La enmienda para ponerse bueno cuando estás enfermo es quedarse en la cama.
narrar Contar, referir lo sucedido.	cuento	Cada noche narro el dinero que guardo en la hucha.
dogma Opinión, creencia o doctrina que se considera verdadera.	verdadera	Esta noticia es muy dogma.

6. DEFINICIONES DE DICCIONARIO que habían leído los alumnos que redactaron las frases de la figura anterior (*izquierda*). Cuando no conocían el vocablo, solían abstraer de la definición algún concepto familiar (*centro*), componían una frase que contenía ese concepto conocido y lo sustituían por el nuevo término.

Fijación biológica del nitrógeno

Se trata de un proceso restringido a muy pocas especies de microorganismos, quizá por su alto coste energético y su extrema sensibilidad al oxígeno, pero de extraordinaria importancia bioquímica, genética, microbiológica y agrícola

Francisco Castillo y Jacobo Cárdenas

Recientes estimaciones de la Organización mundial para la Alimentación y la Agricultura (FAO) acerca de los requerimientos alimentarios de la humanidad para finales de siglo prevén la necesidad de un aumento del 60 por ciento en la producción agrícola. En los últimos 50 años creció notablemente la producción de alimentos en los países desarrollados gracias al empleo de fertilizantes, pero la crisis energética desencadenada en la década de los 70 supuso una drástica caída en el uso de los mismos, sobre todo de los que contienen nitrógeno, el nutriente más común que limita la producción agrícola. Sin embargo, la forma diatómica de este elemento, N_2, abunda sobremanera en la atmósfera terrestre (10^{15} toneladas), en las aguas oceánicas y en las rocas (10^{16} toneladas). Esta paradoja se explica teniendo en cuenta que las plantas sólo pueden asimilar el nitrógeno en forma combinada, bien como amonio o como nitratos.

Las interconversiones de los diferentes compuestos nitrogenados en la biosfera constituyen el ciclo del nitrógeno, en el que intervienen plantas, microorganismos y animales. En este ciclo existe un eslabón de gran importancia cuantitativa y cualitativa para la producción agrícola: se trata del proceso de fijación biológica del N_2 mediante su reducción a amonio. Dicha fijación se lleva a cabo en la naturaleza a baja presión y temperatura, si bien requiere energía en forma de compuestos reducidos y ATP.

El avance en el conocimiento de la bioquímica de la fijación de N_2 ha pasado por dos fechas clave: 1960, en que el grupo de J. E. Carnahan, de la compañía Du Pont, obtuvo el primer extracto acelular que reducía el nitrógeno molecular a nitrato, y 1966-67, en que M. J. Dillworth, de Australia, y Robert H. Burris, de la Universidad de Wisconsin, descubrieron, simultáneamente, que la nitrogenasa, complejo enzimático responsable de la reducción biológica de N_2 a NH_3, catalizaba también la reducción de acetileno a etileno, facilitándose así el análisis de la actividad por cromatografía de gases.

La reacción química responsable del proceso de fijación biológica del N_2 consiste en la transferencia de seis electrones al N_2 para dar NH_3, proceso que requiere el aporte de energía libre en forma de ATP. La reacción debe estar acoplada *in vivo* a la oxidación de azúcares u otros compuestos energéticos o bien a la fotofosforilación del ADP, para que transcurra espontáneamente. La razón estriba en la alta barrera de energía que supone la activación de una molécula tan estable como el N_2, en la que los dos átomos de nitrógeno se encuentran unidos por un enlace covalente del tipo *sigma* y dos enlaces del tipo *pi*. Esto explicaría la necesidad de un reductor de bajo potencial y ATP.

La capacidad de fijación biológica del N_2 está restringida prácticamente a microorganismos procariotas que poseen nitrogenasa: este sistema enzimático cataliza la transferencia de electrones al N_2 y está constituido por dos enzimas oligoméricas, la dinitrogenasa reductasa y la nitrogenasa propiamente dicha.

La dinitrogenasa reductasa (llamada también Fep o componente II) es un dímero de 55 a 65 kilodalton con dos subunidades idénticas. Se conoce la secuencia de aminoácidos de las Fep de *Anabaena, Clostridium, Klebsiella* y *Azotobacter*, y se ha comprobado que existe un alto grado de conservación de la secuencia alrededor de cinco residuos de cisteína pertenecientes a la porción amino terminal del protómero. El grupo prostético de esta enzima es un centro sulfoférrico que contiene cuatro átomos de hierro, otros cuatro de azufre unidos al hierro (S lábil) y cuatro átomos más de azufre de cisteína. En algunas estirpes de Rodospiriláceas la dinitrogenasa reductasa requiere, para su activación, una proteína de 20 kilodalton, ATP y Mn^{2+}.

El otro oligómero, la dinitrogenasa propiamente dicha (conocida también por MoFep, o componente I), es un tetrámero de 200 a 250 kilodalton y consta de dos tipos diferentes de subunidades alfa y beta, con una estructura cuaternaria alfa 2 beta 2. Cada subunidad tiene un peso molecular cercano a 60.000, en la inmensa mayoría de los casos. Todas las MoFep contienen dos átomos de molibdeno y de 28 a 34 átomos de hierro no hemínico, así como entre 26 y 28 átomos de azufre lábil. Por tratamiento ácido se puede extraer de esta proteína un cofactor de Fe, Mo y S lábil, en la proporción 1:6:8-9, respectivamente. Se supone que el grupo prostético es el sitio activo de la MoFep.

Además de reducir el N_2 a NH_3, la nitrogenasa reduce los H^+ a H_2 mediante una reacción irreversible que consume ATP. Dicha reacción transcurre simultáneamente con la reducción de N_2, por lo que supone una disipación de poder reductor y ATP, pues el hidrógeno molecular escapa a la atmósfera, a menos que el organismo posea una hidrogenasa capaz de reciclar el H_2, oxidándolo de nuevo a H^+ obteniendo energía en el proceso.

Otros sustratos de la nitrogenasa son compuestos estructuralmente análogos al N_2, que poseen dos átomos terminales unidos por un triple enlace. A pesar de su analogía estructural, el monóxido de carbono no es sustrato de la nitrogenasa e inhibe la reducción de N_2 y otros compuestos, pero no la producción de H_2.

El mecanismo de acción de la nitrogenasa incluye los siguientes pasos: activación de la Fep, formación de un complejo transitorio entre Fep y MoFep, transferencia de electrones de la Fep a la MoFep y, por último, reducción del sustrato. La activación de la Fep tiene lugar mediante la unión de un complejo formado por Mg^{2+} y ATP

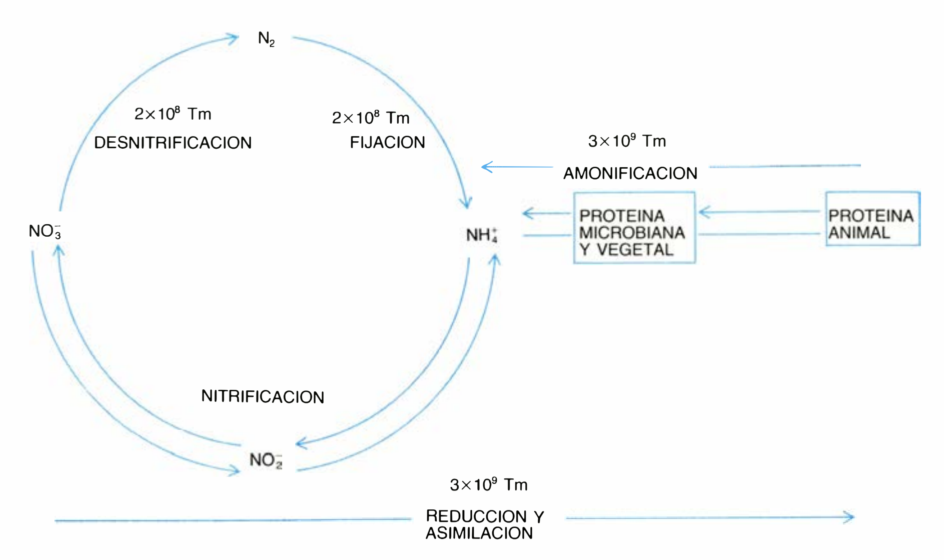
a dos sitios diferentes de la enzima, con lo que ésta sufre un cambio de conformación. *In vivo*, la ferredoxina o la flavodoxina (donadores de electrones en muchas reacciones redox fisiológicas) y el ditionito o el metil viológeno reducido (sustancias químicas utilizadas habitualmente como potentes agentes reductores en ensayos *in vitro*) transfieren los electrones a la Fep activada, en un proceso que se inhibe (*in vitro*) por ADP (lo que explicaría la inhibición de la fijación de N_2 por este nucleótido).

Tras la formación, en una segunda fase, de un complejo transitorio de Fep y MoFep, se produce la transferencia de electrones de la Fep a la MoFep. En este proceso se hidroliza el ATP. El requerimiento de ATP ha sido explicado recientemente por W.G.Zumft, de la Universidad de Karlsruhe, en términos potenciométricos: la energía libre del ATP sería necesaria para hacer más positivo el potencial redox de la MoFep, lo que posibilitaría la transferencia reversible de electrones desde la Fep. Una vez reducida, la MoFep se separa de la Fep, deshaciéndose el complejo constituido en la segunda etapa. Finalmente, se reduce el sustrato sobre el que actúa la nitrogenasa. La trasferencia de electrones desde la enzima hacia el sustrato tiene lugar en sucesivos pasos de un electrón (seis por cada N_2 reducido). El diaceno (N_2H_2) parece ser una especie química intermedia en la reducción del N_2, que transcurre en el grupo prostético de molibdeno. Se han descrito hasta cinco sitios diferentes para la reducción de otros tantos sustratos de la nitrogenasa.

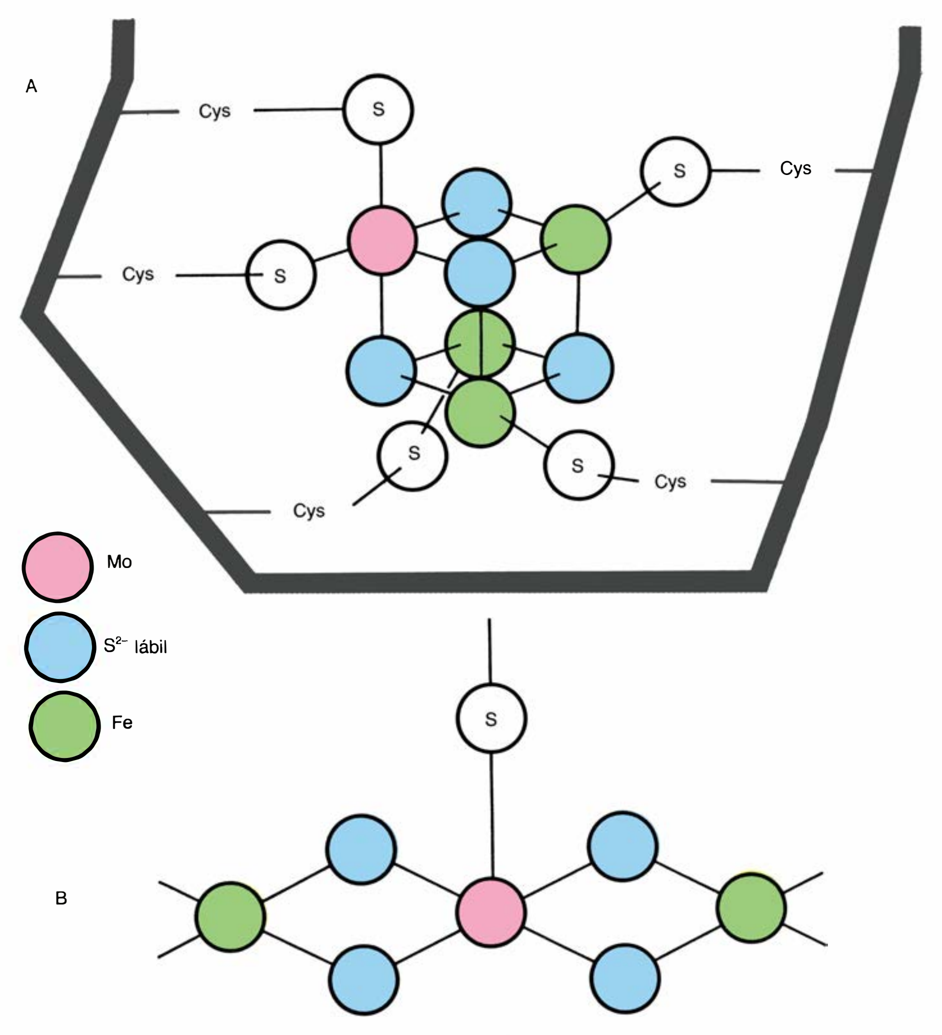
Las proteínas oxidorreductoras que transfieren electrones a la nitrogenasa son las ferredoxinas (*Clostridium*) o las flavodoxinas (*Azotobacter*), ambas de bajo peso molecular. Se distinguen por su grupo prostético, constituido en las primeras por hierro no hemínico y azufre, y por flavina en las segundas.

El donador primario de electrones varía según el tipo de organismo. En los clostridios (anaerobios estrictos), la reacción fosforoclástica del piruvato suministra ferredoxina reducida y ATP. En *Azotobacter* (aerobio), el gradiente electroquímico de H^+ creado a través de la membrana bacteriana por la respiración permite la reducción de la flavodoxina y la subsiguiente transferencia de electrones de ésta a la nitrogenasa. Este mecanismo podría actuar también en los bacteroides, formas microbianas que realizan la fijación del N_2 en los nódulos de las leguminosas. En los organismos fotosintéticos, el poder reductor puede proceder de la degradación de azúcares (cianobacterias fijadoras) o del transporte electrónico fotosintético mediante la ferredoxina reducida directamente por el aceptor primario de electrones (Clorobiáceas) o indirectamente por un flujo de electrones dirigido por la luz desde el succinato hacia la ferredoxina en contra de un gradiente de potencial (Rodospiriláceas).

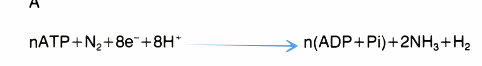
Se conoce bastante acerca de los mecanismos genéticos responsables de la bioquímica de la fijación del nitrógeno. En *Klebsiella pneumoniae* la capacidad

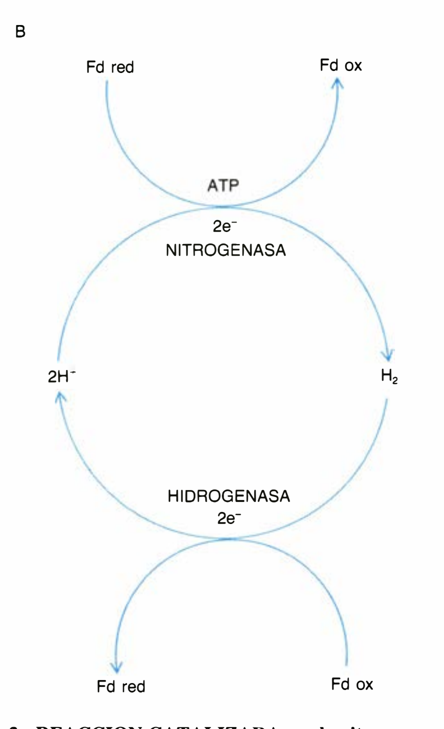


1. CICLO DEL NITROGENO: moviliza anualmente 3×10^9 toneladas métricas de nitrógeno. La fijación biológica del nitrógeno devuelve al suelo las 2×10^8 toneladas métricas que se pierden por desnitrificación.



2. ESTRUCTURA DEL GRUPO PROSTETICO de la MoFe proteína, que ha sido analizada por distintas técnicas espectroscópicas. La técnica EXAFS revela la existencia de esferas de coordinación de hierro y azufre para el molibdeno, con unas distancias interatómicas que pueden explicarse mediante estos dos modelos.





3. REACCION CATALIZADA por la nitrogenasa (*A*). Dicha reacción disipa parte del poder reductor y del ATP para reducir H^+ a H_2. La hidrogenasa de ciertos microorganismos recicla este poder reductor al mediar la transferencia de electrones desde el H_2 a la ferredoxina oxidada (Fd ox) y de la forma reducida de ésta (Fe red) a la nitrogenasa. Esto permite generar ATP si los electrones pasan desde la ferredoxina reducida hasta el oxígeno a través de la cadena respiratoria, impidiéndose al mismo tiempo la inhibición de la enzima nitrogenasa por H_2 y O_2.

de fijación del nitrógeno está ligada a la síntesis de una serie de proteínas codificadas por una región del cromosoma bacteriano denominada *nif*. Se han identificado en ésta 17 genes ubicados entre los *loci his* (responsable de la síntesis de histidina) y *shiA* (responsable de las enzimas de la oxidación de shikimato). Los genes *nif* poseen la información genética necesaria para la síntesis de la nitrogenasa, la ferredoxina o flavodoxina, el cofactor de FeMo, y de las proteínas encargadas del control de la síntesis y actividad de la enzima.

Los 17 genes constan de unos 24 pares de kilobases y se agrupan en ocho operones. El operón *nif J* contiene el gen que codifica la síntesis de la piruvato flavodoxina oxidorreductasa, enzima que cataliza la transferencia de electrones desde el donador primario (piruvato) hacia el donador fisiológico de la nitrogenasa (flavodoxina). El operón *nif F* contiene la información para sintetizar la flavodoxina; el *nif M* es responsable de la modificación postraduccional y consiguiente activación de la Fep. El operón *nif H* codifica la síntesis del monómero de la Fep; *nif D*, la subunidad alfa de la MoFep; *nif K*, la subunidad beta. Se desconoce la función del operón *nif Y*. Además de los genes *D* y *K*, la síntesis de MoFep activa requiere seis genes, cinco de los cuales participan en la biosíntesis o inserción del cofactor FeMo. De los restantes operones *—nif XNE, BQ, VSU* y *nif AL—* el último, *nif AL*, regula la transcripciòn de los genes *nif*.

A diferencia de *Klebsiella pneumoniae*, la genética de la fijación en otros microorganismos es menos conocida. Así, en *Azotobacter* resulta difícil obtener mutantes, dado su alto contenido en ADN repetitivo, si bien se sabe que los genes *nif* no están agrupados en este organismo. En *Rhizobium* el problema se complica por la existencia de determinantes genéticos adicionales: de nodulación (genes *nod*) y reciclado del H_2 (genes *hup*), además de la expresión génica correspondiente a la planta huésped. No obstante, se sabe que algunos de estos genes residen en plásmidos y que la organización de los genes *nif* difiere según que las estirpes de rizobios sean de crecimiento rápido o lento.

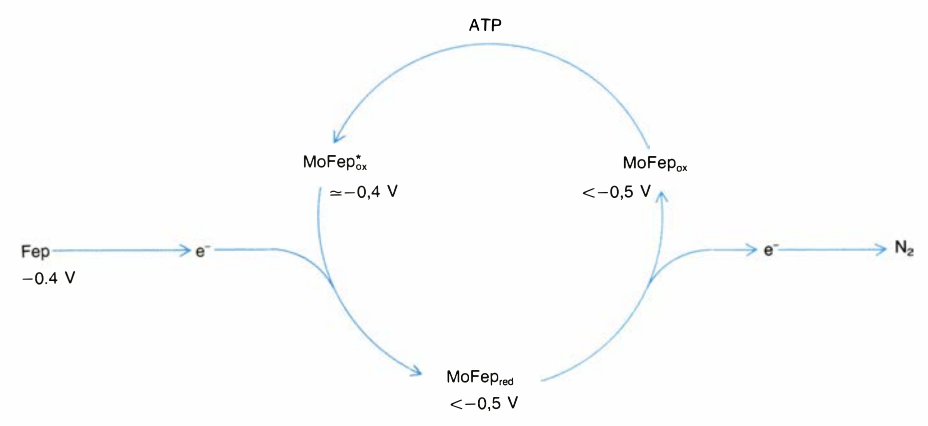
La bacteria fototrófica fijadora *Rhodobacter capsulatus* tiene 16 genes *nif* en cuatro grupos: un operón *nif HDK*, un agrupamiento *nif* de 10 a 14 kilobases, que contiene unos ocho genes distribuidos como mínimo en tres operones, una tercera región del cromosoma con un *locus nif* no regulador y una cuarta con un *locus nif* regulador. Estos operones están dispersos en el cromosoma bacteriano, separados por regiones no-*nif*.

En la cianobacteria fijadora *Anabaena* sp, que posee heterocistos, una región de 30 kilobases contiene los genes *nif H, D, K* y *S*, análogos a los de *Klebsiella*. Los genes *nif H* y *D* son adyacentes, pero *nif K* está separado de ellos unas 11 kilobases. Cuando se forman los heterocistos, los genes *nif* se reordenan, formándose el operón *nif HDK*. Sólo después de la reordenación se puede expresar el gen *nif D*.

El conocimiento de la genética de los microorganismos fijadores ha permitido crear híbridos. Así, los genes *nif* de *K. pneumoniae* se han transferido a una serie de bacterias incapaces de fijar N_2 utilizando diversas técnicas de transferencia de material genético con resultados muy diversos, de los que se puede concluir que la capacidad de fijación de nitrógeno requiere una información genética adicional a los genes *nif*, como el gen *nar* (necesario para incorporar Mo en la nitrato reductasa) u otros genes que codifican procesos relacionados con la fijación (por ejemplo, el acoplamiento de la síntesis de ATP al transporte electrónico).

Dadas la riqueza y complejidad de la bioquímica y la genética de la fijación biológica del nitrógeno, no es de extrañar que este proceso esté altamente regulado. Las vías metabólicas que suministran amonio se hallan sometidas a un estricto control, toda vez que la asimilación del amonio es un paso limitante en la síntesis de proteínas. Es lo que ocurre con la fijación de N_2, que, como queda indicado, importa, además, un alto coste energético en forma de poder reductor y ATP.

Aun con diferencias peculiares, el proceso regulador posee características generales comunes en los distintos organismos fijadores. Se pueden distinguir tres niveles diferentes de regulación en todas las nitrogenasas: regulación de la síntesis y degradación de la enzima, de la actividad de ésta y del su-



4. ACTIVACION de la MoFe proteína oxidada por el ATP: la MoFep es la dinitrogenasa propiamente dicha. Tal activación aumenta su potencial normal redox hasta −0,4 volt, permitiendo el paso reversible de electrones desde la Fe proteína. La MoFep reducida recùpera su estructura de bajo potencial y su capacidad para reducir el sustrato. El ATP activa la dinitrogenasa quizá por fosforilación transitoria de la proteína.

ministro de energía y poder reductor para el proceso. Primeramente, la regulación de la síntesis y degradación de la nitrogenasa. En la transcripción de la región *nif* y su traducción proteica intervienen el amonio o la glutamina, el oxígeno y el molibdeno, mientras que, al parecer, el N_2 no induce la síntesis de la enzima. El amonio bloquea la síntesis de la nitrogenasa. La expresión de los genes *nif* en *Klebsiella* está controlada por el operón *nif AL* y por los genes *ntr A, B* y *C*. La interacción entre los productos de los genes *ntr* y el promotor *nif L* regula la expresión de los genes *nif*; la interacción entre dichos productos y otras regiones del genoma regula la expresión de los genes *gln A* (glutamina sintetasa), *nar* (nitrato reductasa), *hut* (utilización de la histidina) y *put* (utilización de la prolina). El amonio, o más probablemente, la glutamina actúan a través de los productos de los genes *ntr*. La unión de un activador codificado por *ntr L* al promotor *nif L* determinaría la formación del producto del gen *nif A*, un activador difusible de los genes *nif*, que equilibraría el efecto del producto del gen *nif L*, un posible represor de los genes *nif*.

En *Rhizobium meliloti* se ha encontrado un gen similar, en su estructura y función, a los *nif A* y *ntr C* de *Klebsiella*. Como, por otra parte, existe una secuencia "consenso" en unos 12 promotores *nif* (regiones del ADN donde se une la ARN polimerasa para iniciar la transcripción), siete de *Klebsiella* y cinco de *Rhizobium*, parece que, al menos en estos dos géneros bacterianos, se da un sistema de regulación que implica secuencias promotoras *nif* y genes (*ntr A* más *nif A* o *ntr C*, o ambos) que pueden activarlas. La secuencia de bases de los promotores *nif H* de *Klebsiella* y *R. parasponium* posee notables semejanzas con la del promotor *xyl A* de *Pseudomonas putida* (entre 15 de 16 bases son idénticas). Igual que los operones *nif*, el operón *xyl ABC* está sometido a una regulación positiva: en presencia de xileno, el gen *xyl R* activa la transcripción. Tales homologías de las secuencias en regiones del ADN que codifican procesos metabólicos tan dispares sugieren la existencia de señales reguladoras similares a las que actúan sobre las regiones *nif*, constituyendo una familia de "regulones" en las bacterias gramnegativas.

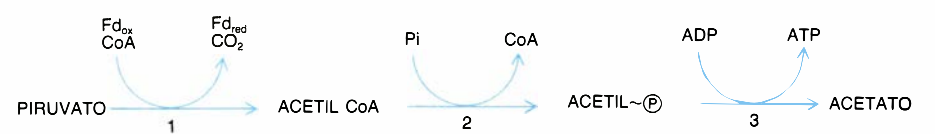
El oxígeno molecular controla también la expresión de los genes *nif*, si bien mediante un mecanismo diferente del descrito. En *Klebsiella*, *Azotobacter* y *Rhizobium*, el O_2 reprime la síntesis de la nitrogenasa, por la posible intervención de un efector negativo de carácter proteico, de peso molecular entre 45.000 y 50.000, producido por el gen *nif L*. Por otro lado, la síntesis de la nitrogenasa rquiere la presencia de molibdeno; en *Klebsiella* se han descrito, además, otros metabolitos reguladores, como el nitrato y algunos aminoácidos que bloquean la síntesis de la enzima.

En otro orden de cosas, los polipéptidos que integran la nitrogenasa son muy estables, ya que la vida media de la enzima en *Rhizobium* y *R. palustris* es de varios días. En cianobacterias, *K. pneumoniae* y *R. palustris* se ha observado una hiperinducción de la nitrogenasa en atmósferas inertes, en condiciones en las que el flujo de nitrógeno hacia las rutas asimiladoras disminuye y acaba por detenerse.

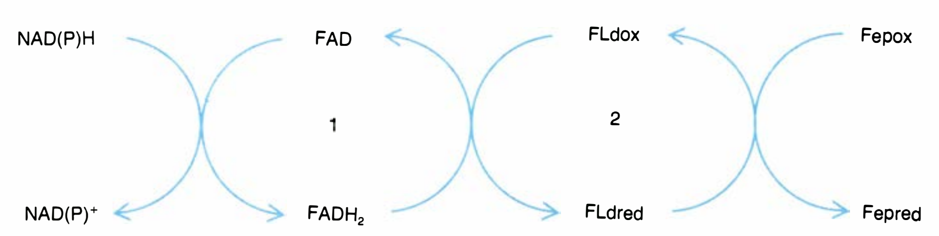
Respecto al segundo nivel de la regulación de la nitrogenasa, el de su actividad, el amonio, el oxígeno molecular y la luz modulan la actividad nitrogenásica mediante un proceso reversible e instantáneo de inactivación/reactivación de la enzima, denominado de apagado y encendido.

La inactivación reversible de la nitrogenasa por O_2 se ha descrito en numerosos microorganismos fijadores. Constituye, según se cree, la primera etapa del proceso de destrucción oxidativa de la enzima. Si este proceso se prolonga, la inactivación pasa a ser irreversible por la posible interacción del radical O_2^- con los sulfuros lábiles de los grupos prostéticos de la nitrogenasa que se oxidan a azufre. La mayor sensibilidad de la Fep a esta oxidación puede deberse a la presencia de un núcleo sulfoférrico entre los dos polipéptidos que componen la enzima, quedando dicho núcleo más expuesto al oxígeno molecular.

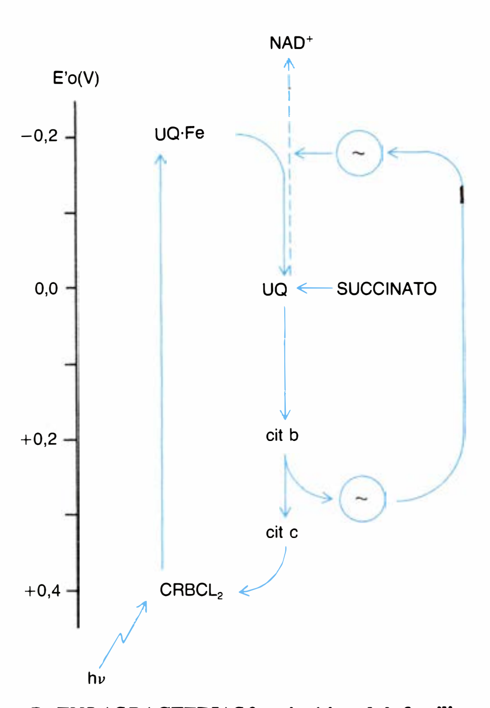
El amonio, por su parte, desencadena un proceso de inactivación reversible de la nitrogenasa en las Rodospiriláceas, *Azotobacter, Spirillum* y cianobacterias; está ausente en *Klebsiella,*



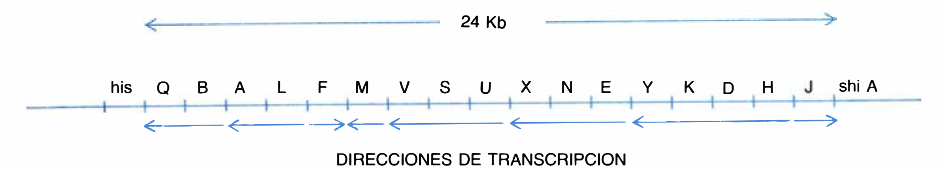
5. RUTA FOSFORCLASTICA del piruvato. Con frecuencia, los microorganismos suministran ATP y poder reductor a la nitrogenasa mediante la ruta fosforclástica del piruvato, que se oxida a acetato con producción de ferredoxina reducida y ATP. En el proceso intervienen tres enzimas: la piruvato ferredoxina oxidorreductasa (*1*), que cataliza la descarboxilación oxidativa del piruvato con ferredoxina y coenzima A; la fosfotransacetilasa (*2*), enzima que participa en la transferencia de fosfato al acetil coenzima A, y, por fin, la acetato quinasa (*3*), que cataliza la fosforilación del ADP por acetil-P y la producción de ATP y acetato.



6. TRANSPORTE ELECTRONICO RESPIRATORIO de los microorganismos. Genera una fuerza protonmotriz. En los fijadores de nitrógeno aerobios, el gradiente de protones hace que la transferencia electrónica desde los nucleótidos de piridina hasta la Fe proteína oxidada sea termodinámica factible. El proceso



7. EN LAS BACTERIAS fotosintéticas de la familia *Rhodospirillaceae*, la activación de la membrana iluminada posibilita la transferencia de electrones desde el succinato al nucleótido de piridina, en contra del gradiente de potencial. En el flujo electrónico participan un dímero de bacterioclorofila, un complejo ubiquinona-hierro, ubiquinona y citocromos.



8. REGION *NIF* del cromosoma de *Klebsiella pneumoniae*. Consta de 24 kilobases y comprende al menos 17 genes agrupados en ocho operones, entre los *loci his* (histidina) y *shi A* (shikimato). La dirección de transcripción de estos operones es hacia el locus *his*, excepto *nif J* (gen estructural de la piruvato flavodoxina oxidorreductasa) y *nif F* (gen estructural de la flavodoxina), cuya dirección de transcripción es hacia *shi A*.

Clostridium y *Rhizobium*. En *R. palustris* y *R. capsulatus*, el verdadero agente inactivador no es el amonio, sino la glutamina que, dependiendo de las condiciones nutricionales de las células, pone en marcha un mecanismo de modificación covalente e inactivación de la Fep. Este mecanismo inactivador implica la formación de un enlace N-glucosídico entre un grupo ADP-ribosilo y un N del grupo guanidinio de la arginina en posición 100 de la cadena polipeptídica. Otros factores desencadenantes de esta interconversión son el oxígeno molecular y la obscuridad. La enzima se reactiva mediante un sistema constituido por una proteína de 20 kilodalton (enzima activadora), Mn^{2+} y ATP. En *Azotobacter*, el amonio parece actuar, además, *per se*, disminuyendo el potencial electroquímico de la membrana.

En *Clostridium pasteurianum*, *A. vinelandii* y algunas estirpes de Rodospiriláceas la nitrogenasa se inactiva *in vitro* por nitrito u óxido nítrico. En las estirpes bacterianas asimiladoras de nitrato, la reducción de éste a nitrito produce la inactivación de la nitrogenasa, con lo que el proceso de fijación queda bloqueado y sólo se desarrolla la asimilación del nitrato, que también produce amonio y sólo consume poder reductor y no ATP, siendo menos costosa para la célula. Resultados recientes obtenidos en nuestro laboratorio de la Universidad de Córdoba indican que, en *R. capsulatus*, el nitrato o el nitrito no actúan como represores de la nitrogenasa y que la inactivación se lleva a cabo, *in vivo*, por acción del nitrito o del óxido de nitrógeno (o de ambos) sobre los centros sulfoférricos de la enzima, donde posiblemente se forman complejos ferro-nitrosilos que determinan la inactivación o bloqueo de la misma.

El tercer nivel de regulación de la nitrogenasa consiste en la modulación del suministro de poder reductor y ATP, necesarios para la reducción de N_2. En *K. pneumoniae*, los genes *nif F* y *nif J* codifican los componentes de la cadena de transporte electrónico a la nitrogenasa y se hallan sometidos al control general de la expresión de los genes *nif*. En *C. pasterianum* la regulación del suministro de poder reductor es innecesaria, ya que esta bacteria disipa el exceso de equivalentes de reducción como H_2. En *A. vinelandii* y *Rhizobium*, el flujo de poder reductor está controlado por el potencial electroquímico de membrana.

El complejo molecular formado por Mg^{2+} y ADP constituye un potente inhibidor de la nitrogenasa, cuya actividad enzimática aumenta en proporción directa a la razón de ATP a ADP. Este factor de regulación interviene en *Clostridium*, *Klebsiella*, *Azotobacter* y *Rhizobium*.

Otro factor regulador es el reciclado de poder reductor llevado a cabo por la hidrogenasa codificada por los genes *hup* en los rizobios y otras estirpes de organismos fijadores. Al reutilizar el hidrógeno molecular producido en la reacción de la nitrogenasa se impide la inhibición de esta última por el propio H_2 y, al derivar los electrones del H_2 hacia el O_2, a través de la cadena respiratoria, se recicla parte de la energía perdida en la reacción de reducción de H^+ catalizada por la nitrogenasa. La eliminación simultánea de O_2 evita la inactivación de la enzima por este gas.

¿Cómo se regula, por último, la fijación simbiótica de nitrógeno? En los microorganismos fijadores simbiontes, la regulación de la fijación de nitrógeno es un proceso más complejo que en las bacterias de vida libre, dado que las relaciones entre la bacteria y la planta huésped introducen nuevos fenómenos sometidos a control. El proceso de formación de nódulos, por ejemplo, se inhibe en presencia de nitrógeno fijado. Otros mecanismos que regulan la nodulación parecen actuar a través del fitocromo y del ácido abscísico.

La expresión de la nitrogenasa en los bacteroides se modifica por diversos factores aportados por la planta. Una vez establecida la simbiosis, la enzima nitrogenasa se inhibe en presencia de nitrógeno combinado, sobre todo por nitrito, y cesa cuando comienza el desarrollo de semillas de la planta huésped (la llamada senescencia de los nódulos). Otros factores que afectan la fijación simbiótica de nitrógeno son la presencia de la hidrogenasa de reciclado de H_2 (que aumenta el rendimiento de la fijación simbiótica) y ciertos factores ambientales: temperatura, concentración de oxígeno molecular y nitrógeno combinado.

Una vez descrita la regulación del

9. EN *KLEBSIELLA PNEUMONIAE* y en otros organismos, los genes *ntr* regulan la transcripción de diferentes regiones cromosómicas relacionadas con el metabolismo del nitrógeno. El producto del gen *ntr A*, posiblemente un factor sigma, se une a la ARN polimerasa y determina la transcripción en los promotores mientras que en presencia de O_2, o de concentraciones pequeñas de amonio, *L* impide la activación de *A* de activaciones de la transcripción de los genes *nif* estructurales, previa detección de formas de nitrógeno combinado con la glutamina, siendo *L* mucho más sensible que *B* a la presencia de éstas. Así, en presencia de altas concentraciones de amonio, *C* es producido en cantidades insuficientes para activar el operón *nif LA*, tivación se inicia por factores ambientales, como la presencia de nitrógeno combinado, oscuridad o bajas los operones *nif*. La represión por O_2 parece deberse a un efecto sobre la conformación del ADN.

proceso de la fijación de nitrógeno, resta exponer los requisitos ambientales para optimizar el proceso con objeto de complementar la fisiología del mismo. Entre ellos, sobresalen la influencia del O_2 y el H_2, el requerimiento de metales y la naturaleza de las rutas enzimáticas de asimilación del producto de la fijación, el ion amonio.

¿Cuáles son los mecanismos fisiológicos de protección de la nitrogenasa frente al O_2? Los dos componentes proteicos del complejo enzimático, y en particular la Fep, se inactivan en presencia de oxígeno molecular, siendo esa inactivación rápida e irreversible. Por ello, a lo largo de la evolución, los microorganismos fijadores han desarrollado estrategias para evitarla: un crecimiento en condiciones anaeróbicas, una conformación proteica idónea o una alta tasa respiratoria, la microaerofilia, la formación de estructuras celulares protectoras y la compartimentación celular.

Las bacterias anaeróbicas estrictas no crecen en presencia de O_2; este grupo queda pues exento de la primera estrategia aludida en el punto anterior. No obstante, algunas bacterias anaeróbicas, verbigracia *C. pasteurianum*, poseen nitrogenasas tolerantes a bajas tensiones de O_2 *in vivo*, si bien *in vitro* la enzima posee una vida media de minutos en un medio aeróbico. Las bacterias aeróbicas facultativas, *Klebsiella* por ejemplo, sólo crecen a expensas de N_2 en ausencia de oxígeno, ya sea porque el medio no lo contenga o porque las trazas del mismo se eliminen por respiración.

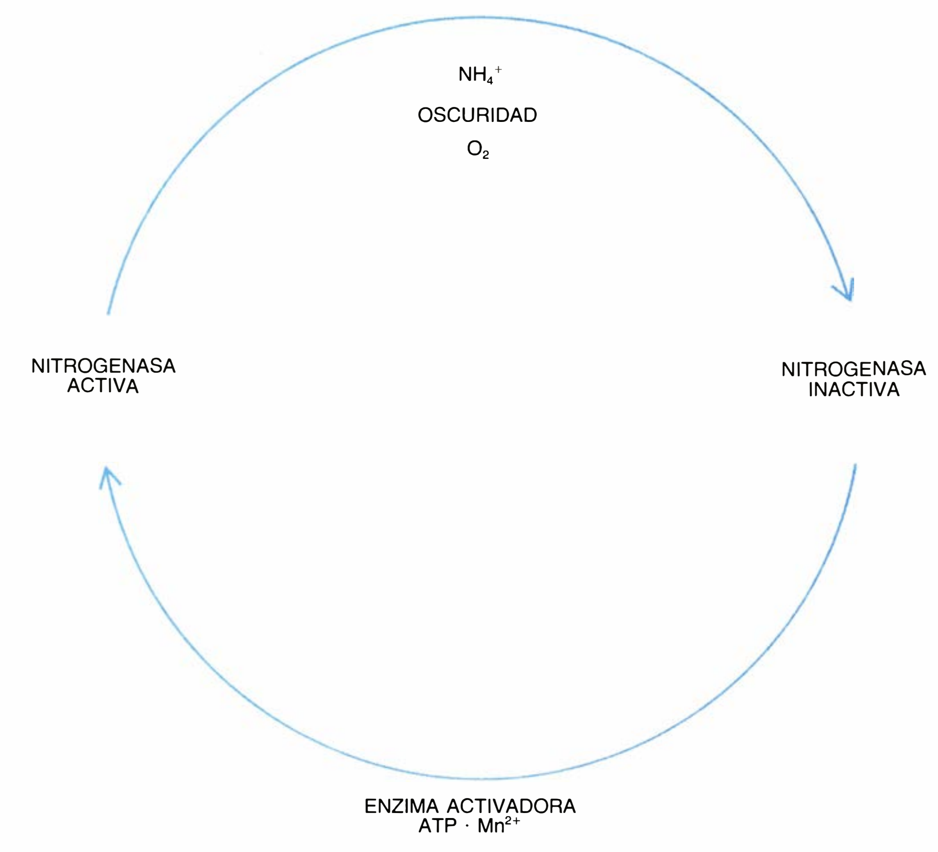
La segunda estrategia consiste en la protección conformacional o en establecer una alta tasa respiratoria. Así, los extractos acelulares de *A. vinelandii* y *A. chroococcum* pueden manejarse en aerobiosis, sin que se pierda la actividad enzimática de la nitrogenasa. Sin embargo, la nitrogenasa de estas bacterias también es sensible al O_2, por lo que debe existir un mecanismo de protección muy eficiente. En este sentido, se ha detectado la presencia en esas bacterias de una proteína de l4 a 24 kilodalton con centros sulfoférricos, capaz de formar con la nitrogenasa un complejo proteico que la protege de la inactivación por O_2. Para que esta protección tenga lugar se requieren los dos componentes de la nitrogenasa, la proteína protectora (llamada proteína de Shetna) e iones magnesio. Un segundo mecanismo de protección de la nitrogenasa en *Azotobacter* es la alta velocidad respiratoria de esta bacteria, en cuyo proceso el citocromo *a2* desempeña un papel crucial. Este citocromo se induce en altas tensiones de oxígeno y posee una actividad de fosforilación baja.

La microaerofilia constituye la tercera estrategia para evitar la inactivación de la nitrogenasa en presencia de oxígeno molecular. Algunos organismos fijadores de N_2 sólo crecen diazotróficamente cuando la tensión de O_2 es muy baja. Es lo que ocurre a algunas Azotobacteriáceas tropicales (*Derxia gummosa*) o las bacterias del género *Xhantobacter*, algunas de las cuales sólo fijan N_2 en presencia de contaminantes que eliminan el O_2 (*X. flavus*). Se trata de microorganismos muy sensibles al dioxígeno que acoplan la fijación de CO_2 y N_2 a la oxidación del hidrógeno molecular.

Otro grupo de fijadores microaerófilos son las bacterias que oxidan metano a CO_2 y H_2O y acoplan dicho proceso a la fijación de dióxido de carbono y nitrógeno. La primera enzima de la ruta de oxidación del metano, la metano monooxigenasa, parece desempeñar un papel protector de la nitrogenasa al eliminar el O_2. La estrategia de la microaerofilia se da también en especies de *Azospirillum, Thiobacillus* y *Arthrobacter*, así como también en las cianobacterias que no forman heterocistos y en las escasas estirpes de *Rhizobium* que se han podido cultivar diazotróficamente *ex planta*.

La inactivación de la nitrogenasa por oxígeno se impide también mediante la formación de ciertas estructuras celulares protectoras. Algunas bacterias diazotróficas se protegen del O_2 mediante la formación de colonias gomosas que se aglutinan al desarrollarse en placas de Petri en la superficie del agar. Otras bacterias crecen formando flóculos o grumos que excluyen el O_2 más eficazmente que las células aisladas, como es el caso de la cianobacteria *Trichodesmium*.

Una última estrategia de protección frente a la inactivación por O_2 es la compartimentación celular. Muchas especies de cianobacterias filamentosas son tolerantes a altas tensiones de oxígeno cuando crecen diazotróficamente, merced a la presencia de células especializadas, los heterocistos, que carecen del fotosistema II y en los que se localiza la actividad nitrogenasa. Los heterocistos poseen una pared poco permeable al paso del O_2 y pueden generar ATP por fotofosforilación cíclica



10. EN LAS RODOSPIRALACEAS, la nitrogenasa puede existir en dos formas, activa e inactiva. La inactivación se inicia por factores ambientales, como la presencia de nitrógeno combinado, oscuridad o bajas tensiones de O_2, y se debe a la ADP ribosilación de la Fe proteína. La reactivación se produce cuando desaparecen o se atenúan los citados factores; en ella participan una enzima activadora, ATP e iones manganeso.



11. FILAMENTO DE UNA CIANOBACTERIA FIJADORA del nitrógeno: Anabaena 7119, cultivada en nuestro laboratorio con urea como fuente de nitrógeno. Ello explica el escaso porcentaje de heterocistos y el predominio de células vegetativas. La actividad nitrogenasa está localizada en los heterocistos, células diferenciadas que poseen sólo el fotosistema I y en las que, por tanto, la tensión de O_2 es muy baja. Las células vegetativas, que poseen los dos fotosistemas, suministran a los heterocistos poder reductor para la fijación de nitrógeno, mientras que el ATP se produce en éstos por fosforilación cíclica. La microfotografía fue tomada por el doctor Plácido Navas, del Departamento de Biología Celular de la Universidad de Córdoba.

y fosforilación oxidativa. Con ello se eliminan, además, las trazas de O_2, que se reduce a agua. El poder reductor necesario para la reducción de dinitrógeno procede de las células vegetativas, que no fijan el N_2 y poseen los dos fotosistemas.

Otras cianobacterias fijadoras, por ejemplo *Gloeothece*, que carecen de heterocistos y poseen nitrogenasas, no se inactivan por O_2; poseen una compartimentación intracelular mediante un sistema interno de membranas que permiten una separación espacial y temporal entre la fijación de N_2 y la fotosíntesis. Además de estos mecanismos, la protección respiratoria parece tener lugar en las cianobacterias, al igual que en *Azotobacter*.

Los nódulos de las leguminosas constituyen un refinado sistema de protección frente al dioxígeno. Estos nódulos contienen formas bacterianas (bacteroides), que fijan N_2, y altas concentraciones de leghemoglobinas, hemoproteínas similares a la mioglobina con una gran afinidad por el O_2: la presión de O_2 necesaria para semisaturar la leghemiglobina es sólo de 0,04 torr, comparado con los valores de 1 torr (mioglobina) y 26 torr (hemoglobina). Este tipo de transportador de oxígeno existe también en los nódulos caulinares de las leguminosas tropicales y en los nódulos de ciertas plantas infectadas por *Frankia*. La leghemoglobina suministra oxígeno a la oxidasa de los bacteroides y actúa así como un sistema tampón, que mantiene la concentración de O_2 en un valor óptimo para el metabolismo respiratorio, sin dañar la nitrogenasa. Si bien la leghemoglobina no es esencial para la fijación de nitrógeno, su presencia aumenta extraordinariamente el rendimiento del proceso.

¿Qué mecanismos utilizan los organismos fijadores para evitar la reacción parásita de producción de H_2 por la nitrogenasa, con la disipación de energía que ello supone? Una de las causas del bajo rendimiento de la fijación de nitrógeno en las células libres se debe a la reacción lateral y simultánea de producción de H_2 por la nitrogenasa. Así, para *C. pasteurianum* y *K. pneumoniae* se ha calculado un requerimiento de 20 y 30 moles de ATP por mol de N_2 fijado. En los rizobios, sin embargo, algunas estirpes poseen una hidrogenasa de reciclado, irreversible, especialmente adaptada para capturar equivalentes de reducción en forma de H_2. Este sistema evita pérdidas de hasta el 40 por ciento de la energía disponible para la fijación de nitrógeno.

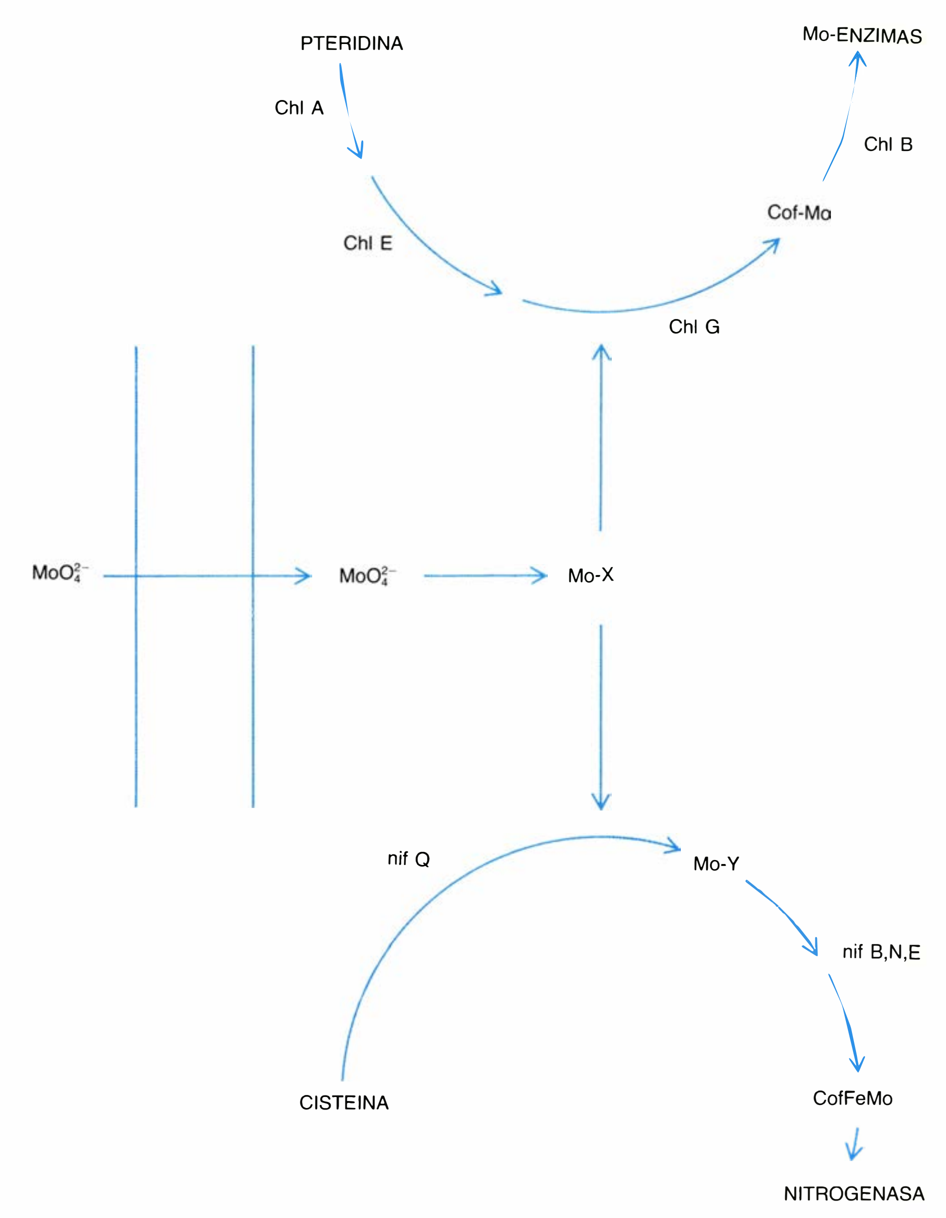
Esa hidrogenasa de reciclado funciona en una sola dirección, transformando el H_2 en equivalentes de reducción utilizables por la célula y existe también en *Azotobacter* y algunas estirpes de Rodospiriláceas. Experimentos realizados en nuestro laboratorio con *R. capsulatus* sugieren la posibilidad de que la fotoproducción de H_2 acoplada a la nitrogenasa constituiría ya un mecanismo de protección de la enzima frente al O_2, a través de la transferencia de electrones desde el H_2 hacia el O_2 en la luz por medio de la hidrogenasa de reciclado y la cadena respiratoria. En virtud de ese reciclado se evita también la inhibición de la actividad de la nitrogenasa por H_2, se genera ATP en la reacción de oxidación de H_2 por la cadena respiratoria, así como se crea poder reductor, vía ferredoxina, para la nitrogenasa.

En la fisiología de la fijación del nitrógeno queda por aclarar el requerimiento de metales. Los organismos fijadores precisan molibdeno y hierro, que entran en la composición de la nitrogenasa y la ferredoxina. La asimilación del Mo para la síntesis de molibdoenzimas pasa por una fase común de la que es responsable, en *K. pneumoniae*, el gen *chl D*. A partir de ese punto divergen las vías de síntesis de los cofactores de molibdopterina y del cofactor FeMo de la nitrogenasa.

El molibdeno es un elemento de transición bastante abundante en la naturaleza. Su concentración media es de unos 15 micromoles por kilogramo, existiendo en dos formas principales (molibdenita y wulfenita) poco asequibles para el consumo biológico, dada su insolubilidad. Desde este punto de vista, la fuente más importante es el ion molibdato que, junto con otros oxianiones, penetra en los organismos a través de la membrana celular mediante sistemas de transporte en el que intervienen proteínas específicas. El molibdeno se acumula en el citoplasma, bien uniéndose a una proteína (*A. vinelandii*) o convirtiéndose en una forma no intercambiable con el exterior (*K. pneumoniae*), lo que asegura una alta concentración intracelular de Mo, necesaria para la síntesis de la molibdoenzimas.

En cuanto al Fe, *A. vinelandii* posee una hemoproteína que participa en el transporte y almacenamiento de ese elemento, imprescindible para la síntesis de nitrogenasa. La fijación de nitrógeno requiere la intervención de otros metales; así, *Azotobacter* y *Gloeothece* requieren Ca^{2+} para la protección de la nitrogenasa frente al O_2 y en los rizobios la nodulación precisa Ca^{2+} y Co^{2+}. (Recientemente se ha descrito en *A. vinelandii* un sistema alternativo de fijación que no requiere Mo, sino vanadio, y que se activa en condiciones deficitarias de dicho elemento, lo que podría tratarse de un mecanismo de adaptación a medios pobres en Mo.)

Finalmente, unas palabras sobre la



12. EL MOLIBDATO se transporta al interior de la célula a través de la membrana y es procesado para la síntesis del cofactor de molibdeno presente en la nitrato reductasa y otras molibdoenzimas, o para la síntesis del cofactor de hierro y molibdeno, presente en la nitrogenasa. En uno y otro caso, intervienen varios genes.

asimilación del amonio y su relación con la fijación del N_2. En la mayoría de los microorganismos fijadores libres, la concentración intracelular de amonio producido por reducción del N_2 es muy pequeña, ya que se asimila e incorpora rápidamente al material celular. Esta asimilación requiere una ruta metabólica con alta afinidad por el amonio y que en la mayoría de los organismos fijadores está catalizada por la glutamina sintetasa y la glutamato sintasa.

En las cianobacterias, el exceso de nitrógeno se acumula en las ficobiliproteínas, una reserva intracelular de N movilizable. En los heterocistos, que carecen de glutamato sintasa, el amonio forma glutamina que es exportada a las células vegetativas y allí convertida en glutamato por acción de la glutamato sintasa. En los microorganismos fijadores simbiontes, gran parte del N se exporta como amonio, incluso cuando los rizobios se cultivan *ex planta*. Las leguminosas transforman ese amonio en asparragina, glutamina o ureidos, que el xilema se encarga de distribuir por la planta.

Razones de economía de espacio nos impiden tratar aquí temas tan interesantes como las aplicaciones prácticas de los avances en el conocimiento de la fijación biológica del nitrógeno. No obstante, estos avances son tan espectaculares que podemos vaticinar para un futuro no muy lejano una nueva revolución agrícola, comparable a la que supuso la aplicación masiva de fertilizantes nitrogenados al suelo.

Juegos de ordenador

Personalidades diversas tratan de hallar equilibrio social en una fiesta informática

A. K. Dewdney

Di recientemente una fiesta a la que no pude asistir. Las personalidades y ocupaciones de mis ocho invitados eran de lo más variado. Vino, por ejemplo, Hilario, el halterófilo, quien había concebido una pasión sin esperanzas hacia otra de las invitadas, la princesa Penélope, mujer sensible y refinada, que se daba aires aristocráticos. Durante la fiesta, Hilario trató persistentemente de acercarse con discreción a la princesa, mientras ella se dedicaba con no menor constancia a rehuírle. Cuantitativamente hablando, a Hilario le hubiera gustado pasar toda la velada a un metro de Penélope; más cerca hubiera resultado socialmente inaceptable. Penélope, por su parte, no estaba cómoda a menos que la separasen de su admirador unos cuatro metros y medio. Pero si en su deambular se apartaba Hilario más de esa distancia, Penélope iniciaba maniobras de aproximación por cuenta propia. Quizá disfrutaba manteniéndose a la vista de Hilario.

A pocos lectores sorprenderá saber que la fiesta se celebró en mi ordenador. Los invitados se representaron mediante caracteres tipográficos. Hilario era una *H*; Penélope, por ejemplo, una *P*. Conforme avanzaba la fiesta, los ocho invitados se movieron de acá para allá por toda la sala, en búsqueda, interminable al parecer, del equilibrio social. De vez en cuando se formaban pequeños apiñamientos de personas que interactuaban estrechamente, pero que se dispersaban ante la llegada de algún nuevo individuo que, de algún modo, perturbaba el delicado equilibrio del grupo. Cada invitado guardaba cierta distancia ideal respecto de cada uno de los demás. Cuando se moviera, lo haría en la dirección que redujera al mínimo su infelicidad. En el contexto de mi fiesta cuantificada (y estereotipada), la infelicidad de los invitados se mide por la suma de las diferencias absolutas entre la distancia ideal y la distancia real a los restantes invitados.

Los invitados están confinados en una única sala rectangular dominada por una mesa abundantemente surtida de apetitosos refrescos y sabrosos canapés. Todos mantienen una distancia ideal de la mesa y de los demás; por ejemplo, quienes se han puesto a régimen prefieren quedarse a metro y medio, mientras que otros no serían felices si les separaran más de 30 centímetros de ella. Lo que no significa que el invitado normal, que no hace régimen, vaya sin más a lanzarse en dirección al *buffet*. Por ejemplo, a Arturo, el artista, le hubiera gustado tomar unas muestras de salsa digital, pero encuentra el camino bloqueado por Nemesio, el negociante (a quien Arturo detesta), que larga una perorata sobre los principios y técnicas de la prospección vertical del mercado.

El programa que generó la fiesta ha sido bautizado PARTY PLANNER (planificador de fiestas) por su creador, Richard Goldstein, especialista en grafismo informático y diseñador de juegos que vive en Los Angeles, California. Rich Gold, como Goldstein prefiere que le llamen, es conocido como diseñador de "The Little Computer People", juego que presenta una sección transversal de una casa, en la que un muñequito (el Enanito informático) va acometiendo sus tareas rutinarias.

Gold ha llamado PARTY PLANNER a su nuevo pasatiempo con intención irónica. Y mantiene que, codificando las relaciones que presumiblemente mantengan entre sí los invitados a una fiesta de verdad, pueden determinarse los posibles resultados de la combinación, expresables en el lenguaje de la dinámica social. Se podría incluso determinar la situación óptima de la mesa de refrigerios. Tal vez la adecuada evaluación del programa haya de quedar a cargo de los lectores que decidan redactar su propia versión y traten de ensayarla en la vida real. Es de esperar que los verdaderos invitados suelten risitas ahogadas al ver en la pantalla sus propias payasadas.

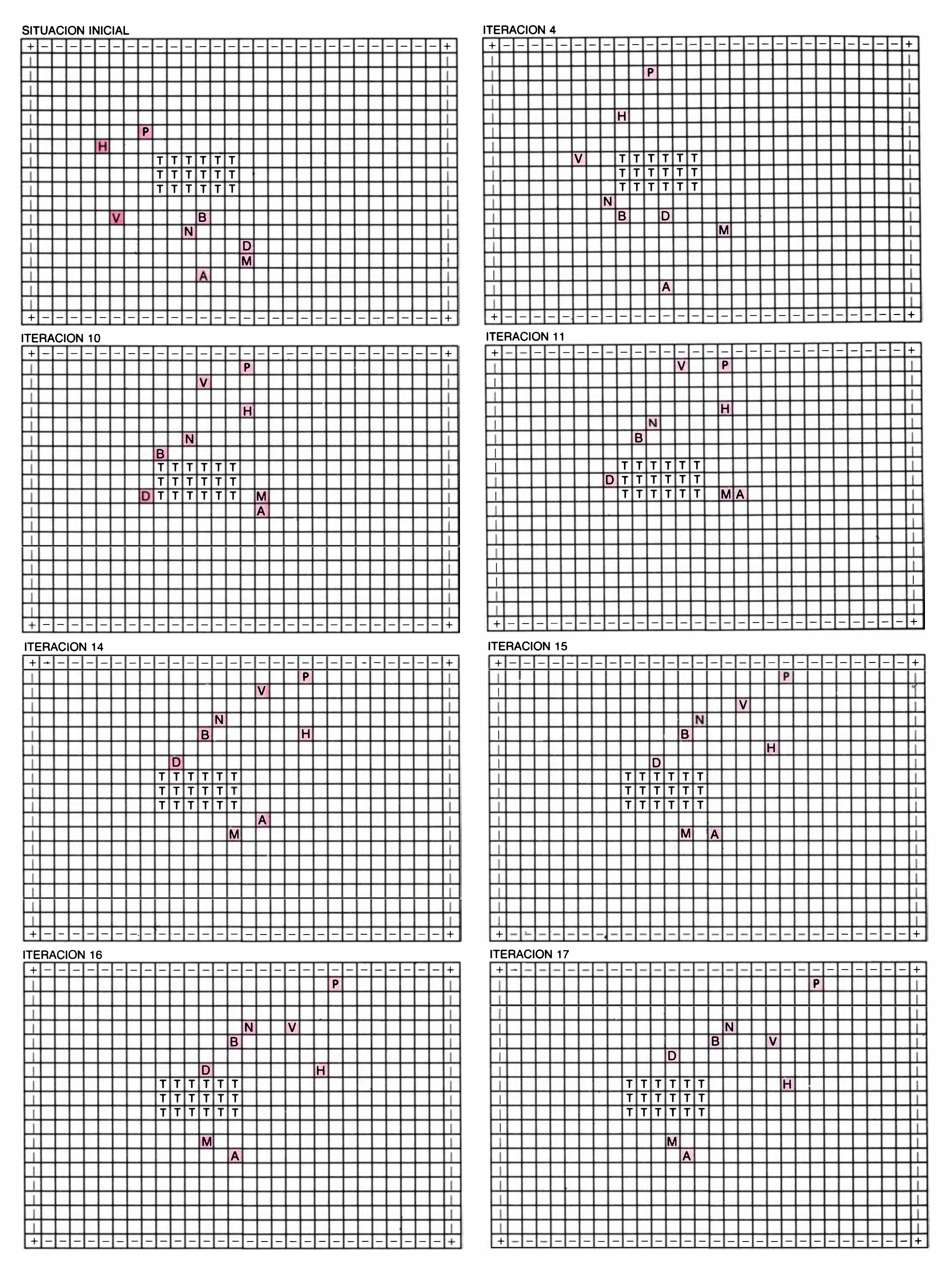
La fiesta informática de Gold puede celebrarse en una sala digital de 600 cuadrados, que forman un tabla de 20 por 30. Cada invitado ocupa un solo cuadrado de la tabla. PARTY PLANNER va examinando, una por una, a todas las persona; el programa traslada hipotéticamente al invitado sometido a examen a cada uno de los ocho cuadrados adyacentes. En cada uno de ellos, el programa calcula el total de infelicidad que en ese cuadro experimenta el invitado, quien pasará a ocupar aquella de las ocho casillas vecinas que haga mínima su insatisfacción.

La organización de la fiesta exige solamente una módica experiencia en programación. La tabla de 20 por 30 recibirá el nombre de *sala*. Dado que los elementos que ocupan la tabla son caracteres alfabéticos, al redactar el programa la tabla *sala* deberá declararse como tabla de caracteres. Las paredes y la mesa de canapés y refrescos están representadas por caracteres fijos. [*véase la figura 2*].

La estructura de PARTY PLANNER es francamente sencilla; puede describirse en dos niveles, del exterior al interior. Aparece primero un bucle, dentro del cual todos los invitados se mueven por la sala incesantemente, o hasta que el usuario del programa pulsa la barra espaciadora. Enunciado algorítmicamente, el bucle exterior se resume así:

NOMBRE	OCUPACION
ARTURO	ARTISTA
BERTA	BOLSISTA
DEMETRIO	DENTISTA
HILARIO	HALTEROFILO
MONICA	MODELO
NEMESIO	HOMBRE DE NEGOCIOS
PENELOPE	PRINCESA
VIOLETA	VIOLINISTA

1. Lista de invitados a una fiesta informática



2. Ocho fases del desarrollo de la fiesta

	A	B	D	H	M	N	P	V	T
A	0	3	2	3,5	0,5	4,5	2	1	0,5
B	3,5	0	1	1	2,5	0,5	1,5	3,5	0,5
D	3,5	0,5	0	2	1,5	1	3,5	2,5	0,5
H	2	2,5	4	0	2	2	1	2,5	1,5
M	2	2	1	1,5	0	2,5	3	4	1,5
N	2,5	1	2	3	1	0	2	3	0,5
P	1	3,5	1,5	4,5	4	3	0	2	1,5
V	2	4	4	1	3	2,5	1,2	0	1,5

3. Tabla de distancias ideales, en metros

repetir
  desde $i \leftarrow 1$ hasta 8
    mover el *i*ésimo invitado
  mostrar la sala
hasta que se pulse el espaciador

En el interior del bucle "repetir" hay un segundo bucle, merced al cual la totalidad de las ocho personas pasan a ocupar nuevas posiciones. Expondré más adelante los misterios que comporta el desplazamiento del *i*ésimo invitado. Para mostrar la disposición de los invitados en la sala se requiere un bucle doble que vaya repasando las casillas de la tabla *sala* una vez computada la nueva situación de los invitados. Utilizando, por ejemplo, el índice j para las filas y el k para las columnas, la rutina irá examinando *sala*(j,k) y presentando en la correspondiente posición de la pantalla el carácter que allí encuentre.

El movimiento del *i*ésimo invitado constituye de por sí una operación complicada, pues su nueva posición dependerá de las posiciones de las demás personas y de las distancias a las que la *i*ésima prefiera estar de ellas. Por supuesto, PARTY PLANNER tiene que disponer de una tabla que muestre la distancia ideal a la que el invitado que nombra cada fila desea estar del invitado que encabeza cada columna [*véase la figura 3*]. Esa tabla, a la que llamaremos *ideal* , tiene que formar parte del programa, sea como archivo de datos, sea mediante una lista de enunciados DATA. El elemento *ideal*(i,j) registra la distancia ideal a la que el *i*ésimo invitado desea hallarse del *j*ésimo, cuyo valor no tiene por qué coincidir con el de *ideal*(j,i). Por ejemplo, Hilario puede desear estar a un metro de Penélope, mientras Penélope preferiría hallarse a unos buenos cuatro y medio de él.

Otras dos tablas unidimensionales, x e y, almacenan las posiciones actuales de los ocho asistentes. En cualquiera de los ciclos de cómputo, el *i*ésimo invitado ocupa una posición cuyas coordenadas son $x(i)$ e $y(i)$. El nivel de insatisfacción de cada invitado se determina como sigue:

presuma $\leftarrow$ *suma*
suma $\leftarrow 0$
para $j \leftarrow 1$ hasta 8
  dist2 $\leftarrow [x(i) - x(j)]^2 + [y(i) - y(j)]^2$
  dist $\leftarrow$ raíz cuadrada de (*dist2*)
  suma $\leftarrow$ *suma* + abs[*dist* − *ideal*(i,j)]

El bucle que empieza "para j. . ." no sólo se ejecuta para la posición actual, $x(i)$, $y(i)$, del *i*ésimo invitado, sino también para las ocho casillas que le rodean, lo que da un total de nueve cálculos. Cada vez que se efectúa el nuevo cómputo, el valor de *suma* se almacena en la variable *presuma*, al objeto de conservarla por mor de comparación. Seguidamente, se pone a cero la variable *suma* y se procede a calcular la distancia *dist* que media entre el invitado *i*ésimo y el *j*ésimo. Se calcula entonces el valor absoluto de la diferencia entre la distancia actual y la ideal (desde la perspectiva del *i*ésimo invitado) y se suma al total provisional.
Una vez calculado el nuevo valor de *suma*, el programa lo compara con el valor previo, que está almacenado en *presuma*. Si el nuevo valor de *suma* es menor que el precedente, PARTY PLANNER ha de conservar las nuevas coordenadas. El siguiente fragmento algorítmico indica cómo podría hacerse:

si *suma* < *presuma*
  entonces $xx \leftarrow x(i)$
    $yy \leftarrow y(i)$

Se mantiene así un registro actualizado de las coordenadas que proporcionan (hasta el momento) disgusto mínimo al *i*ésimo invitado. Una vez calculadas la totalidad de las nueve posiciones, el *i*ésimo invitado avanza hasta la posición que menor desagrado le produzca. El modo más sencillo de efectuar los nueve cálculos es mediante un bucle doble que utilice las variables x e y en lugar de las variables indiciadas $x(i)$ e $y(i)$. Así, x recorrería los valores desde $x(i) - 1$ hasta $x(i) + 1$; y, desde $y(i) - 1$ hasta $y(i) + 1$. Una forma sencilla de construir el bucle es sumar a $x(i)$ e $y(i)$ los incrementos dx y dy, respectivamente:

para $dx \leftarrow -1$ hasta 1
  para $dy \leftarrow -1$ hasta 1
    $x \leftarrow x(i) + dx$
    $y \leftarrow y(i) + dy$

A los planificadores de reuniones les queda por resolver otra complicación: no debe consentirse que los invitados pisoteen la mesa de refrescos ni que atraviesen las paredes. Por este motivo, cada vez que vaya a ensayarse un nuevo juego de coordenadas x e y, PARTY PLANNER ha de verificar si respetan los límites que corresponden a las paredes y la mesa. En la tabla *sala* utilizada en la versión del programa aquí descrita, las cuatro paredes se encuentran en $x = 1$, $x = 30$, $y = 1$ e $y = 20$. En cuanto alguna de las coordenadas del *i*ésimo invitado coincida con la correspondiente de las paredes, debe omitirse el cálculo de la insatisfacción. Análogamente, la mesa de refrescos de mi sala ocupa las abscisas comprendidas entre $x = 10$ y $x = 15$ y las ordenadas limitadas entre $y = 9$ e $y = 11$. Cuando, a la vez, x se halla en el primer intervalo e y se halla en el segundo, el invitado está en inminente peligro de destruir objetos que son propiedad del anfitrión. Lo mismo que antes, el cálculo de insatisfacción correspondiente se pasa por alto. Los puristas pudieran insistir, además, en que los invitados no pasen unos por encima de otros. Sin embargo, en las fiestas bien planeadas eso no ocurre con suficiente frecuencia para que valga la pena tenerlo en cuenta.

El programador arranca la fiesta seleccionando las posiciones iniciales de cada invitado, que pueden darse tecleando manualmente las coordenadas o dejando que el programa las determine aleatoriamente. En ambos casos ha de impedirse que los valores asignados coincidan con la mesa o las paredes.

Magi, mi auxiliar cibernético, ha experimentado con variantes de PARTY PLANNER. ¿Por qué motivo, razona, ha de guardar cada invitado una distancia ideal a todos los demás? Tal vez algunos sean enteramente neutrales hacia otros. Cuando así ocurre, mi amigo Magi inserta un 1 en la casilla apropiada de la matriz de distancias ideales. Cuando el programa procede a considerar la atracción que ese invitado siente por los demás, revisa los valores de las distancias ideales. Cuando el valor es 1, el correspondiente cálculo se salta: ese invitado no contribuye para nada al placer o disgusto del primer invitado.

Debo insistir a los lectores en que experimenten con distintas configuraciones de la sala, número de asistentes a la reunión y tabla de distancias ideales. Gold ha sugerido celebrar incluso las que él llama "fiestas irracionales", en las que, por así decirlo, los invitados se

reclutan entre desconocidos que pasan por la calle. Dicho de otro modo, la tabla de distancias ideales se llena con números elegidos al azar en un intervalo de distancias adecuado. Por ejemplo, si la dimensión máxima de la sala fuera de 8 metros, podríamos tomar al azar enteros comprendidos entre 1 y 16 y multiplicarlos por 0,5. De ese modo, la distancia ideal a que un invitado desea estar de otro oscilaría entre medio metro y ocho metros.

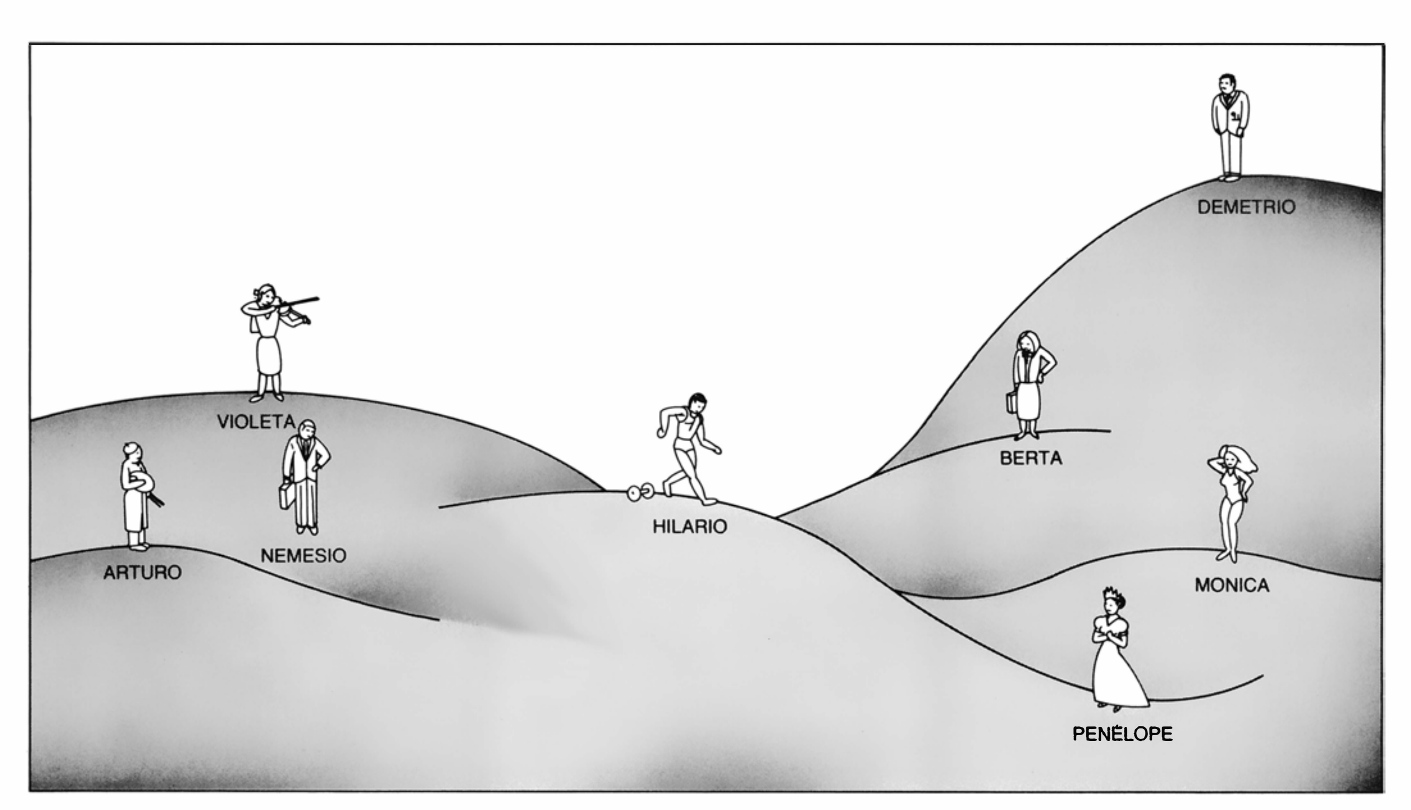
Resulta fascinante experimentar con diversas listas predeterminadas de invitados. Los resultados son en ocasiones predecibles. Por ejemplo, si todas las distancias ideales son mayores que el tamaño de la sala, los asistentes tienden a convertirse en flores del empapelado, arrastrándose de un lado a otro adosados a la pared, en vano intento por rehuir a todos los demás. (El autor se ha encontrado en reuniones así.) Por otra parte, si todas las distancias ideales son pequeñas, los invitados formarán un único y caluroso grupo de conversadores, apiñados junto a los canapés y las bebidas. Se obtienen cómicos resultados estableciendo un ciclo sin fin de amores no correspondidos: *A* ama a *B*, pero *B* detesta a *A*. Al propio tiempo, *B* ama a *C*, pero *C* odia a *B*. La cadena continúa hasta que el círculo se cierra en *A*. En función de la distribución inicial de los invitados, se presencia una interminable persecución con románticos torbellinos ocasionales y algún que otro *cul-de-sac*.

La noción de distancia ideal no constituye una mera ficción matemática; los especialistas en conductismo se valen de una noción similar, llamada distancia social. En nuestra interacción diaria con otras personas, tendemos espontáneamente a adoptar una distancia que depende de nuestra movilidad relativa y de la clase de relación que mantengamos con los demás. El estudio de las distancias sociales se denomina proxémica. Entre los hallazgos de esa disciplina se cuenta el descubrimiento de que las distancias sociales están determinadas en parte por la cultura, el papel desempeñado en la sociedad y el sexo. Los norteamericanos, por ejemplo, se sienten a veces un poco molestos al conversar con personas de países donde las distancias sociales son más pequeñas. El fenómeno podría estudiarse en una situación grupal utilizando PARTY PLANNER. Hagamos que la mitad de los invitados deseen encontrarse a 30 centímetros de distancia de los demás, y que la otra mitad prefiera encontrarse a una distancia de un metro. ¿Persistirá indefinidamente el movimiento de las personas, o acabará por emerger una configuración final estable?

La pregunta anterior nos lleva, se quiera o no, al dominio de los sistemas dinámicos. Desde un punto de vista abstracto, una fiesta informática del tipo de la descrita consta de una matriz de distancias, un espacio celular bidimensional (finito o infinito) y un conjunto de símbolos que se trasladan por turnos de acuerdo con el valor de una función de potencial. Desde la perspectiva de un símbolo dado (es decir, un invitado), el espacio es un plano ondulante. La altura de cualquier punto de ese paisaje dinámico es el valor de la función de potencial correspondiente al símbolo. El valor es, sencillamente, la suma de las diferencias entre las distancias a los símbolos dadas por la matriz y sus distancias a los restantes símbolos.

El movimiento de cada símbolo es similar al de una bola que rodase por efecto de la gravedad; la bola tiende siempre a moverse "cuesta abajo". Sin duda porque razona de ese modo, Gold suele describir el comportamiento de los invitados a sus fiestas informáticas diciendo que buscan continuamente "valles de placer". Por otra parte, cada símbolo habita en un paisaje diferente. Lo que para uno de los asistentes es un valle de placer, para otro puede ser un monte del Calvario [*véase la figura 4*].

Dado un espacio celular concreto, tanto si es una fiesta celebrada en una sala como si se trata de un plano infinito o de un espacio tórico del tipo con que tan frecuentemente nos encontramos en esta sección, las preguntas que se formula el investigador abstracto son sencillas: ¿Cómo son las matrices de distancia que garantizan la estasis final de los símbolos? ¿Qué matrices aseguran que la conducta final acabará siendo periódica? La segunda cuestión



4. Hilario el halterófilo baja por una pendiente de infelicidad hacia Penélope, la princesa

solamente tiene sentido en el caso de espacios infinitos. En espacios finitos, forzosamente habrá de acabar por repetirse alguna configuración. A partir de ese momento, los símbolos se comportarán con implacable periodicidad. En espacios bidimensionales infinitos, ¿cuáles son las matrices que nunca provocarán una conducta periódica?

Gold ha preparado una versión particularmente interesante de PARTY PLANNER en un contexto geográfico. Invitemos a una fiesta informática a las ocho ciudades mayores de los Estados Unidos (la sala tendrá que ser grande). Con otras palabras, hagamos que la distancia ideal entre cada par de invitadas sea reflejo de la distancia real entre las ciudades correspondientes. Sorprendentemente, al colocar inicialmente al azar a las invitadas y dejarlas vagar libremente de acuerdo con las reglas del juego, ¡las posiciones relativas que ocupan al acabar suelen ser las correctas! Los lectores que prueben a realizar este experimento pueden quedar momentáneamente desconcertados por la aparición de un mapa orientado de modo distinto de lo habitual, pero la verosimilitud de las posiciones relativas es innegable. Es de presumir que el fenómeno se repita para cualquier conjunto de distancias entre puntos del plano.

Como pintor que es, Goldsmith persigue lo que llama simbolismo algorítmico. PARTY PLANNER no emergió de la necesidad de Gold de planificar fiestas, sino de su necesidad de pintar. Escribe Gold: "los cuadros tenían que contener varios objetos, como naranjas, manzanas, violines, martillos, etcétera. Yo quería pintar[los] de modo que en el lienzo los objetos semejantes quedaran próximos y los disímiles alejados. Había construido una matriz que indicaba las distancias ideales que cada objeto debería tener respecto de [cada uno de] los demás, pero descubrí que no era tarea sencilla hallar a ojo tal disposición . . . Empecé a preguntarme qué sucedería si pudiese dotar de animación. . . a los objetos y dejarlos errar en busca de sus propias posiciones. No me esperaba yo la preciosa danza que trazaron al tratar de minimizar su insatisfacción. ¡Acababa de nacer el planificador de fiestas!".

Para los lectores que prefieran gastar más que sudar, Gold dispone de disquetes adecuados para ordenadores IBM PC y compatibles, así como una versión adaptada a los prototipos de la serie Apple. Su dirección es 815 North Gardner Street, Los Angeles, California. 90046. Estados Unidos.

Taller y laboratorio

Hay sustancias fibrosas y pegajosas que propenden a formar rosarios de gotas

Jearl Walker

Muchos físicos se han sentido intrigados por la tendencia de ciertos líquidos fibrosos a contraerse para formar pequeñas cuentas o perlas. Podemos encontrarlas en algunos líquidos pegajosos que se conforman en hilos, como es el caso de las hebras circulares de ciertas telarañas, o el de un puente de saliva que tendamos entre el índice y el pulgar. C. V. Boys, autor del libro clásico *Soap Bubbles and the Forces Which Mould Them*, en una conferencia que, hace ya muchos años, pronunció ante la London Institution, mostró otro fenómeno de este tipo. Para ello, mojó una pajita en aceite de castor y untó con él una fibra de cuarzo. El aceite se contrajo de inmediato en gotitas de menos de 0,01 mm de diámetro.

En una serie de trabajos publicados en 1879 y 1892, Lord Rayleigh abordó ese fenómeno de la formación de cuentas. Sus investigaciones se basaron en experimentos anteriores realizados por el físico belga Joseph A. F. Plateau, a quien se recuerda aún por sus estudios pioneros acerca de las películas delgadas. Cuando un líquido se estira en forma de hilo, la tensión superficial hace mínima el área de su superficie confiriendo al hilo una forma cilíndrica. Al mismo tiempo, aparecen unas ondas que recorren el hilo y lo deforman en una serie periódica de zonas anchas y estrechas. Estas ondas son inevitables y se originan en el movimiento que produce el estiramiento del hilo, en cualquier sacudida ligera que pueda sufrir el cuerpo que le sirve de soporte y en el movimiento propio del aire.

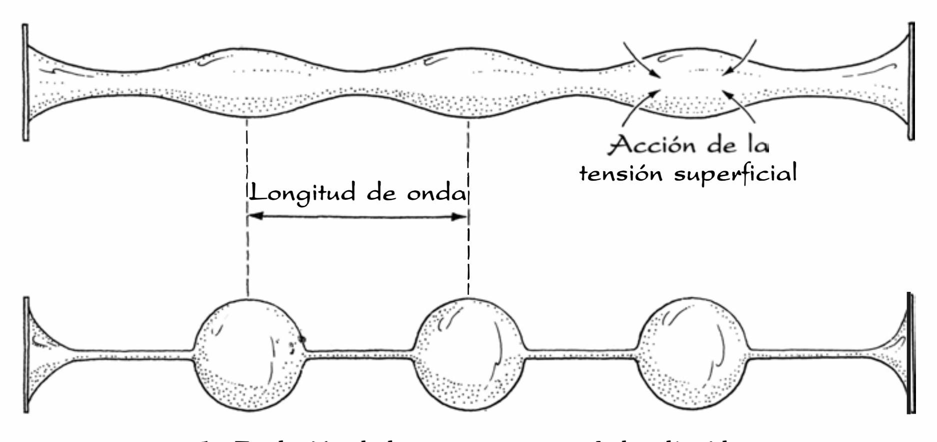
Plateau demostró que la longitud de onda de una onda determina si el hilo recupera o no su forma cilíndrica tras el paso de la onda. Si la longitud de onda es inferior al perímetro del hilo, la deformación producida por la onda aumenta la superficie global. El área de las zonas estrechas disminuye, pero el de las zonas que se ensanchan aumenta mucho más. En cuanto la onda ha pasado, la tensión superficial hace que el hilo retorne a su forma cilíndrica para que la superficie se haga mínima.

Si la longitud de onda es mayor que el perímetro, la deformación disminuye la superficie global. En tal caso, el área de las zonas estrechadas decrece más de lo que aumenta el área de las zonas ensanchadas. Ocurre entonces que la tensión superficial acentúa la deformación, haciendo que las zonas ensanchadas se conviertan en gotículas y las estrechadas en un hilo más fino que el primitivo. El espaciado de las cuentas es igual a la longitud de onda. Además, un hilo endeble puede romperse, liberando las cuentas. Pero si el hilo es resistente, nuevas ondas pueden crear un segundo conjunto de cuentas menores, entremezcladas con las del primer conjunto, y todas ellas enhebradas en un hilo que puede ser ya imperceptible.

Rayleigh descubrió que el hilo líquido inicial presenta inestabilidad máxima cuando la onda que lo recorre posee cierta longitud de onda crítica. Una onda de tal longitud genera cuentas con mayor rapidez que las ondas de otras longitudes y, por tanto, predomina en la formación de las cuentas. Si la viscosidad del líquido puede pasarse por alto, la longitud de onda crítica vendrá a ser una vez y media el perímetro del hilo. Las ondas con una longitud del orden de la mencionada producen una serie de cuentas separadas por una distancia igual al perímetro inicial del hilo. Ahora bien, si la viscosidad es alta, como ocurre en un hilo de vidrio fundido, la longitud de onda crítica es mucho mayor, hay menos cuentas y éstas se hallan más separadas.

Un ejemplo común de líquido tendido lo encontramos en una película de jabón suspendida entre dos soportes. Jurjen K. van Deen, de La Haya, ha estudiado varios de los límites de estabilidad para estos casos. (En mi artículo del mes pasado, describí parte de sus dispositivos.) Para sus experimentos acerca de la estabilidad, preparó dos anillos, de 50 mm de diámetro cada uno, soldando alambre de cobre. Estos anillos se instalan horizontalmente, uno encima del otro, en un soporte.

Para tender una película entre ambos anillos, van Deen sopla una burbuja de jabón de modo que quede bien sujeta entre ambos. Como la solución se escurre gradualmente por la película, es necesario aportar solución nueva a través de un tubo contiguo a la parte superior de la burbuja. Una prolongación del anillo superior se ajusta holgadamente al tubo y sirve para conducir la solución hacia la burbuja. El líquido, conforme va escurriéndose hacia la parte inferior de la burbuja, tiende a



1. Evolución de las cuentas en una hebra líquida

reunirse formando una gota, la cual, al desprenderse, hace que la burbuja oscile. Estas oscilaciones se eliminan colocando un trozo de alambre debajo mismo de la burbuja. Gracias a este alambre, la gota se desprende con suavidad.

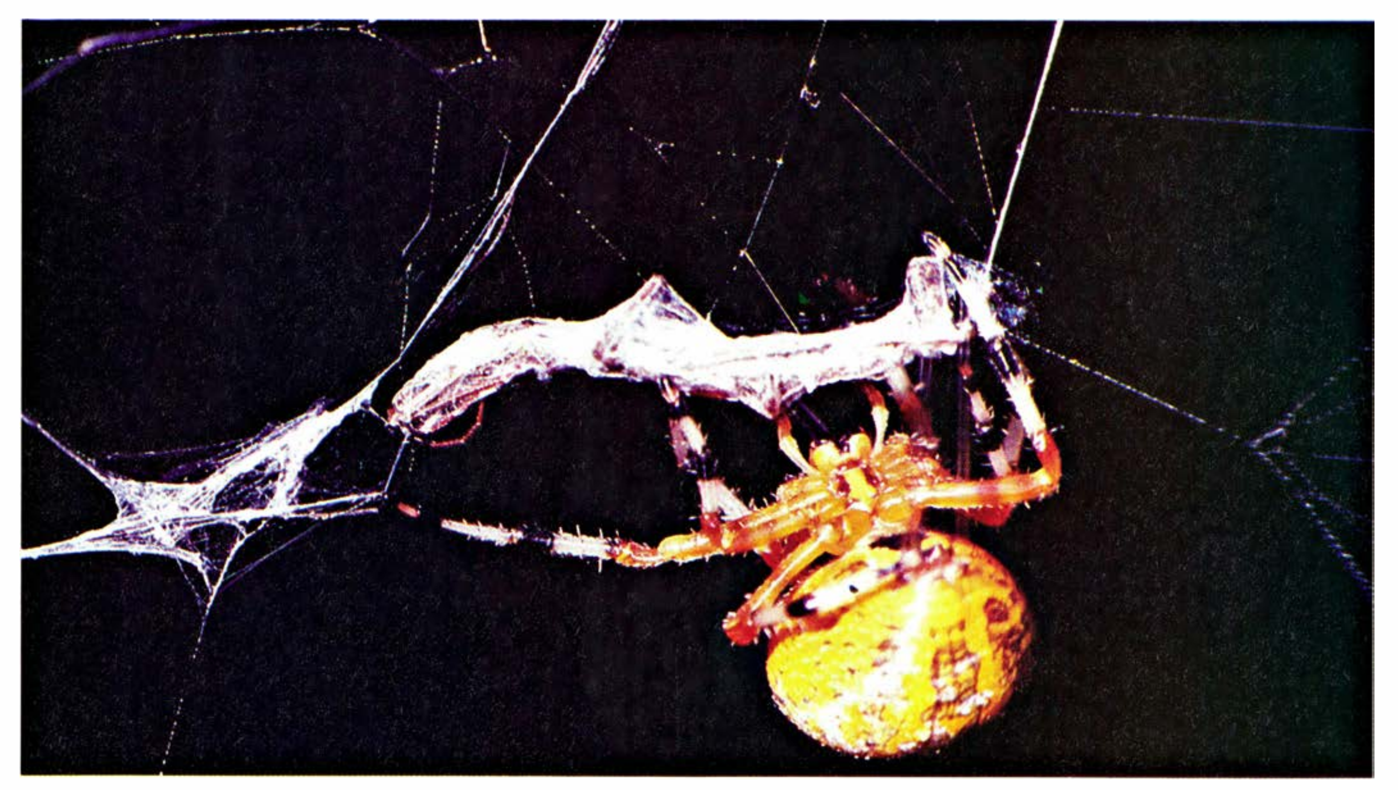
La burbuja es esférica porque la tensión superficial tira hacia adentro, tendiendo a hacer mínima su superficie. La presión del aire encerrado en la burbuja contrarresta el tirón hacia adentro. (De hecho, la causa es el exceso que tiene la presión del aire interior sobre la presión atmosférica.) La burbuja es estable cuando la presión del aire que encierra vale 4 $\pi S/r$, donde S es la tensión superficial y r es el radio de la burbuja.

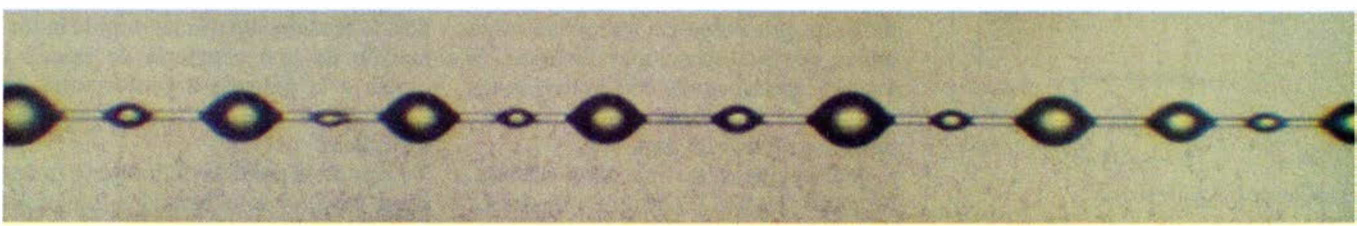
Para determinada serie de experimentos, van Deen usa una aspiradora con la que reducir la presión del aire interior a la burbuja. Lo consigue con un tubo que clava a través del anillo superior. El tubo lleva una pinza con la que se controla el caudal de aire que sale por él. En cuanto decrece la presión del aire, la burbuja comienza a cambiar de forma. Cuando esa presión llega a valer 2 $\pi S/r$, los lados de la burbuja generan un cilindro. Esta forma requiere menos presión que una esfera, pues la curvatura neta del cilindro es menor que la de la esfera. (Un cilindro no presenta curvatura a lo largo de su altura.)

Es característico que la existencia de las burbujas cilíndricas dependa del cociente de L, la distancia entre los anillos, entre d, el diámetro de los mismos. Si ese cociente es mayor que π, la burbuja se hace inestable y se deshace para formar dos burbujas menores, una en cada anillo. Quizás este límite en la estabilidad sorprenda menos si lo redefinimos así: una burbuja cilíndrica puede existir si L es menor que el perímetro del cilindro.

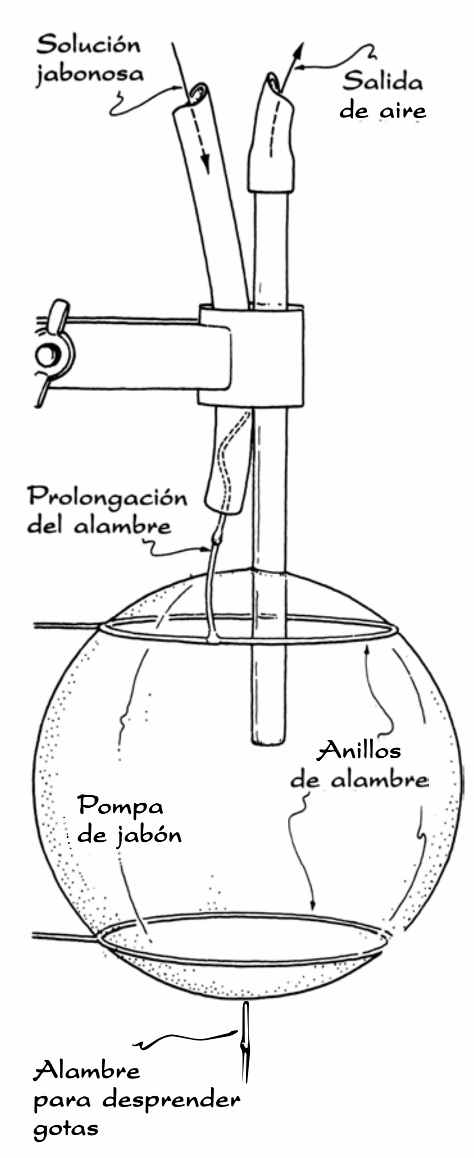
De esta manera, el límite de estabilidad aparece relacionado con la formación de cuentas en un hilo líquido. Recuérdese que las ondas responsables de la formación de cuentas poseen una longitud de onda mayor que el perímetro del hilo. En una burbuja cilíndrica, se desarrollan también ondas debidas a perturbaciones aleatorias, pero sus longitudes de onda no pueden ser superiores a L. Por consiguiente, si L se mantiene inferior al perímetro del cilindro, las ondas resultan demasiado cortas para provocar que el cilindro se deshaga. Cada vez que una onda recorre el cilindro, la superficie global aumenta y la tensión superficial devuelve inmediatamente la burbuja a su forma cilíndrica. Si L es mayor que el perímetro, las ondas pueden tener una longitud de onda mayor que el perímetro, disminuyendo entonces la superficie global de la burbuja. La tensión superficial tiende a deformar entonces el cilindro. De todo ello resulta que el centro de la burbuja se aplasta hasta dejar dos burbujas esféricas en cada anillo.

En otro experimento, van Deen sujeta una burbuja esférica en los dos anillos y pincha los dos casquetes cercados por ellos. Esos punzamientos abren la burbuja a la atmósfera, con lo que la

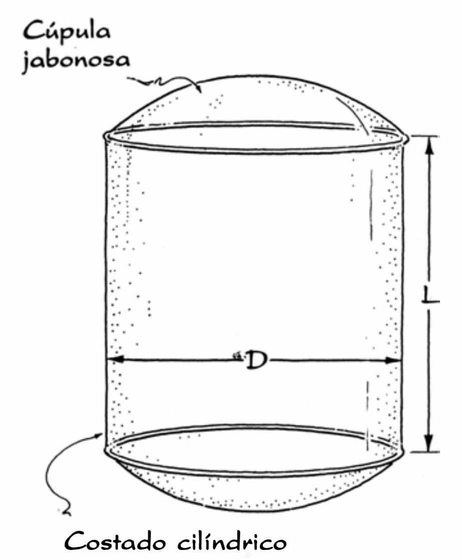




2. Una araña en su tela y una micrografía de una hebra en rosario



3. Dispositivo de Jurjen K. van Deen para estudiar pompas de jabón



4. Pompa cilíndrica tendida entre dos anillos

presión interna cae a cero. Esta variación hace que la curvatura del resto de la película se anule también. Pero, ¿cómo es posible que la película quede tendida entre ambos anillos con una curvatura nula?

La razón de ello reside en que la burbuja forma una catenoide, la superficie que se genera cuando una catenaria se hace rotar en torno a un eje. (Se llama catenaria a la curva creada cuando un objeto filiforme se suspende entre dos puntos fijos.) La superficie catenoide produce el área mínima para una película tendida entre dos anillos cuando en el interior de la estructura hay ausencia de presión. Esta superficie tiene, además, una curvatura neta nula. En efecto, aunque la superficie sea de hecho curva, cada uno de sus puntos forma parte de una curva cóncava en una dirección y de una curva convexa en la dirección perpendicular; por cuyo motivo la curvatura neta es nula.

Esta configuración establece un límite sobre la estabilidad de la película en el que interviene el cociente entre L y d. La forma catenaria puede existir sólo si L/d es inferior a 0,663. Si esta cifra se rebasa, la parte central y más estrecha de la catenoide se colapsa bruscamente, quedando en cada anillo una película plana. La causa reside en que, cuando L/d excede de 0,663, las películas planas poseen un área combinada menor que el área de la catenoide. (En realidad, el área combinada de las películas planas es menor que la de la catenoide cuando L/d es mayor que 0,528; no obstante, la catenoide es estable entre 0,528 y 0,663, debido a que su superficie tendría que aumentar momentáneamente para poder transformarse en dos películas planas. A menos que las ondas que recorren la película de jabón sean fuertes, la tensión superficial restablece la catenoide tras el paso de cada onda. Pero no lo consigue cuando L/d es mayor que 0,663, en cuyo caso hasta la onda más débil desencadena inmediatamente el colapso.)

Van Deen descubrió que resultaba difícil mantener una catenoide estable con un cociente L/d mayor que 0,5. En estos casos, la catenoide casi siempre se deshacía por culpa de las ondas originadas por perturbaciones diversas. Si alguien experimenta con películas catenoidales, deberá aislarlas de vibraciones y corrientes de aire.

A comienzos de los años setenta, M. A. Erle, R. D. Gillette y Derek C. Dyson, de la Universidad de Rice, estudiaron también las formas estables de las películas de jabón, pero emplearon un dispositivo en el que la película se tendía entre dos discos coaxiales y paralelos. Trabajaron con películas simétricas en torno al eje geométrico, a las que sometían a perturbaciones también simétricas. La película se fijaba a unas llantas que sobresalían de los discos. El aire se extraía o se añadía a través de un pequeño orificio practicado en uno de los discos. Cuando hinchaban la película, ésta acababa llegando a un límite de estabilidad, en el que sus costados se combaban hacia afuera. Cuando se impulsaba más aire al interior, la película se soltaba.

Al extraer aire, los costados de las películas se desplazaban hacia adentro, hasta llegar a otro límite de estabilidad. Entonces, el centro se aplastaba, quedando en cada disco una película semiesférica. La forma de la película inmediatamente antes del colapso depende una vez más de L/d. La forma límite es una combadura hacia adentro cuando el cociente es menor que π y una combadura hacia afuera cuando es mayor que π.

Supongamos que L/d sea menor que π. Imaginemos cómo varía la forma de la película a medida que se extrae aire, empezando con la película en el estado límite de combadura hacia afuera. Conforme decrece el volumen de aire, la estructura se contrae y su curvatura aumenta, elevándose la presión del aire encerrado. Para un volumen dado de éste, la película posee una forma única, determinada por la interacción entre la curvatura neta y la presión del aire. Cuando se extrae más aire, la curvatura comienza a disminuir y la presión del aire baja. Cuando la curvatura se hace nula, el costado de la película es una catenaria.

Esta configuración recibe el nombre de catenaria de tipo 1. Una catenaria de tipo 2 puede tener asimismo una curvatura neta nula y ser, por ello, compatible con una presión nula del aire encerrado. Las funciones matemáticas que definen ambas configuraciones son similares, pero la catenaria de tipo 2 tiene una parte central más estrecha y una superficie mayor. Así, cuando la película se forma sobre anillos, la tensión superficial impide la formación de una catenaria de tipo 2 y obliga a la película a conformarse en catenaria de tipo 1, disminuyendo su superficie.

Cuando la película de jabón se forma sobre discos y se reduce el volumen del aire encerrado, es posible una catenaria de tipo 2. Pero sea una película en

catenaria de tipo 1 e imaginemos su cambio de forma al extraer más aire. Sus costados comenzarán a desplazarse hacia adentro, a medida que la presión interna baje con respecto a la externa, y la curvatura neta será hacia afuera. Después de que el aire alcance una presión mínima, su presión comenzará a subir hasta que vuelva a ser nula y la curvatura neta es también nula. Entonces, la curva que forma la película de un disco a otro es una catenaria de segundo tipo.

Erle, Gillette y Dyson descubrieron que es posible que una película se disponga en catenaria de tipo 2 si el cociente *L/d* está comprendido entre 0,47 y 0,663. Para cualquier valor por debajo del límite inferior, la película colapsa y forma dos semiesferas antes de que la presión interna alcance, por segunda vez, un valor nulo. Si *L/d* es, por ejemplo, 0,5, y la solución jabonosa es perdurable, la película puede sobrevivir como catenaria de tipo 2 durante más de una hora.

Este grupo de investigadores se ocupó también de la estabilidad de películas muy infladas. Teóricamente, si la película es simétrica con respecto a su eje geométrico y se consideran únicamente perturbaciones simétricas, la película puede combarse hacia afuera de manera muy notoria antes de hacerse inestable. El límite calculado se alcanza cuando la superficie de la película tendida, o puente, es perpendicular al reverso de cada disco.

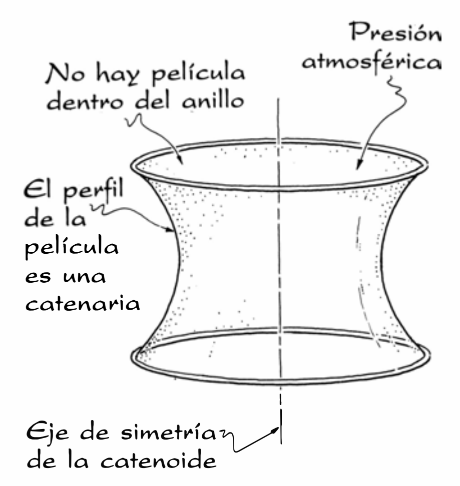
Recientemente, M. R. Russo y Paul H. Steen, de la Universidad de Cornell, redujeron considerablemente este límite teórico examinando perturbaciones asimétricas. Para ello prepararon un puente de aceite de silicona que tendieron entre dos placas de latón. Rodearon el puente de una mezcla de *n*-propanol y agua que tenía la misma densidad que el aceite. El efecto de esta igualdad de densidades era eliminar la distorsión normalmente debida a la gravedad, pues el empuje hidrostático que sufría el puente era igual a su peso.

Pusieron los líquidos en un recipiente cerrado de plexiglás, para eliminar la evaporación y los consiguientes cambios de densidad. El aceite se añadía o se extraía del puente mediante un tubo flexible inserto en un pequeño orificio abierto en una de las placas. Con una jeringuilla acoplada al otro extremo del tubo, producían las variaciones en el volumen de aceite.

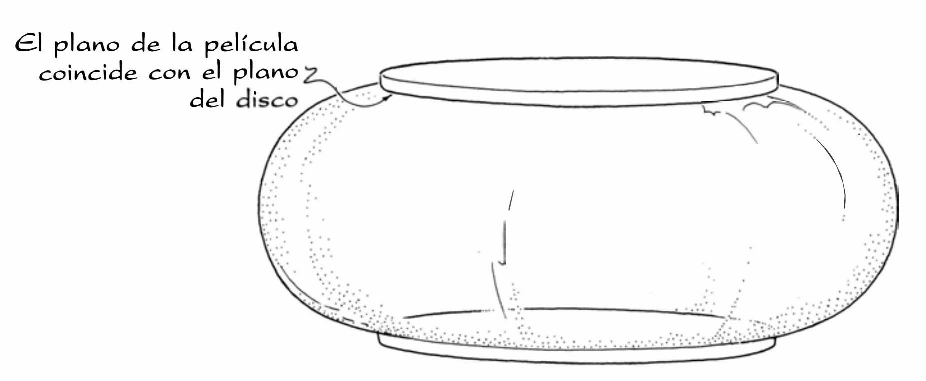
Partiendo de un puente de aceite cilíndrico, Russo y Steen reducían la distancia entre las placas valiéndose de un accionamiento micrométrico. Como el volumen de aceite permanecía constante, el puente se abombó hacia afuera. El canto biselado de las placas y su recubrimiento de parafina facilitaban la fijación del aceite en ellas. El puente permaneció simétrico hasta que su superficie contigua a las placas se puso tangente al plano de las mismas. Al reducir aún más la distancia entre las placas, aumentando la combadura puente afuera, éste se deformó repentinamente por un costado. Tal pandeo redujo su superficie.

J. M. Haynes, de la Universidad de Bristol, ha estudiado los puentes cilíndricos de líquido, investigando su estabilidad al aumentar su longitud. Ya sabía que son inestables cuando *L/d* es mayor que π. Los puentes se rompen formando semiesferas sobre las placas a las que se fijan. Haynes descubrió además que muestran una sorprendente estabilidad para cocientes menores. Cuando *L/d* excede de 9/4, la superficie del cilindro líquido es realmente mayor que la total de los hemisferios. Sin embargo, mientras el cociente sea menor que π, los puentes no se colapsan para formar semiesferas, pues para ello tendrían que aumentar momentáneamente de superficie. Esa barrera desaparece cuando *L/d* adquiere el valor π.

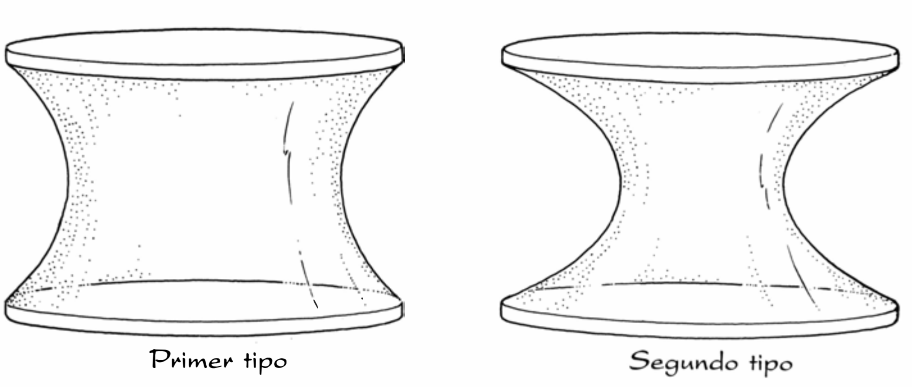
Varios lectores han corregido lo que afirmé en agosto acerca del Cubo Minotaur, pues han encontrado dos soluciones y no una. Las primeras cartas que me llegaron procedían de John Stewart y Jim Rostirolla, del Bellevue Community College, en Bellevue, Washington, Leonard Gordon, de Chico, en California, y Michael Keller, de Ellicott City, en Maryland. Keller halló la primera solución "a mano" y luego quedó sorprendido cuando en su ordenador apareció la segunda. Las soluciones poseen las mismas jugadas para las piezas *A* y *B*. El problema, tal como lo presenté, consistía en emplear las seis piezas del rompecabezas (tres tetracubos y tres pentacubos) para formar un cubo de tres casillas por arista.



5. Superficie catenoide



6. Límite de abombamiento



7. Tipos de catenaria

Libros

Sistema solar, álgebra de ayer, cordados y cartas de Darwin

Teodoro Roca, Javier de Lorenzo, Arturo Morales y Luis Alonso

El Sistema Solar, por Roman Smoluchowski. Prensa Científica, S.A. Barcelona, 1984. Los tres ensayos de este libro versan sobre los aspectos que involucran la teoría y el manejo de multitud de hipótesis para el desarrollo de escenarios concretos y plausibles que den cuenta del nacimiento del Sol, la formación de los planetas y sus satélites y, finalmente, del futuro del sistema solar. En estos ensayos, el libro, aun no presentando ningún escenario nuevo para la explicación de los temas arriba indicados, expone esos fenómenos de manera clara y con los mínimos tecnicismos posibles. Su lectura, fluida y amena, facilita, para los lectores no iniciados en estos temas, la comprensión de los mismos.

Los capítulos del libro, cinco en total, versan sobre la descripción de los objetos que se encuentran en el sistema solar. Para ello usa información conocida antes de la era espacial, pero incorpora la obtenida por todas las sondas espaciales conocidas hasta este año y entra tan sólo en los detalles suficientes que permiten una descripción de los objetos que componen el sistema solar. La descripción de los planetas gaseosos gigantes como Júpiter y Saturno y sus satélites, basada en su mayor parte en la información obtenida con las sondas Voyager, es precisa y especialmente interesante por su novedad para el gran público. La inclusión, en la edición española, de algunos datos del encuentro del Voyager con Urano indica un especial interés por mantener el libro en la actualidad con que debe ser tratado el tema. Las ilustraciones no son especialmente espectaculares aunque sí muy buenas. El nivel es adecuado para el gran público.

En el tratamiento del tema se encuentran a faltar referencias concretas al medio interplanetario y también a las técnicas (incluidas las espaciales) que han permitido obtener la información que se describe en los capítulos. Creo que es muy importante para un libro que versa sobre un tema científico que incorpore en su contenido una explicación de las herramientas utilizadas para los descubrimientos que se describen. El epílogo, donde se aborda el siempre interesante tema de la vida en el sistema solar, resulta de modélica sencillez, aunque no aporta ningún apunte novedoso especial.

Los apéndices finales con datos sobre los objetos del sistema solar están muy bien presentados y también es de resaltar la idea de ofrecer una visión de las distancias del sistema solar por el método de colocar a los planetas en el borde superior de la página que les correspondería según la escala de dibujo preestablecida. En resumen, podría decirse que es un buen compendio sobre el sistema solar, a pesar de que en este campo se producen grandes avances continuamente y, en los últimos años, las sondas espaciales han proporcionado informaciones valiosísimas sobre la constitución y dinámica de los planetas y satélites. (T. R.)

A History of Algebra. From Al-Khwarizmi to Emmy Noether, por B. L. van der Waerden. Springer-Verlag, 1985. Historia del álgebra escrita por un algebrista. Y un algebrista que, aparte de su obra intrínseca como matemático, ha dejado su impronta como autor de un libro de texto, *Moderne Algebre*, 1931, que constituyó la base para un nuevo hacer en la materia. En ese texto introducía, de modo sistemático, escolar, los conceptos que eran ya esenciales en el desarrollo de la disciplina: los de cuerpos e ideales, grupos, números hipercomplejos o álgebras lineales... Y no sólo los conceptos, sino que difundía, a nivel "elemental", el enfoque entonces calificado como propio de la escuela formal, abstracta o axiomática. Obra en la que hemos aprendido álgebra las generaciones posteriores. Y demostración de que un libro de texto puede suponer, para la marcha de una disciplina científica, un suceso tan revolucionario como una memoria o un ensayo cuando ese texto codifica un momento de creación; van der Waerden se situaba, así, en el interior de la historia de la matemática, con el mismo título que el marqués de L'Hôpital, Lacroix, Serret, Jordan...

Pero van der Waerden, partícipe de la matemática y de la historia de la matemática, ha dedicado su tiempo y esfuerzos a hacer la historia del campo en el que ha trabajado. Con el riesgo propio de una ausencia de perspectiva, con el riesgo de reseñar como hechos más fundamentales aquellos en los que él ha trabajado, en los que se ha visto inmerso. Riesgo que asume y que, con total honestidad, la misma que tuviera en *Moderne Algebre* al indicar las fuentes de cada concepto, de cada teorema o demostración, llega a señalar en el prefacio: "Esta historia del álgebra se inscribe en un proyecto más ambicioso, el de hacer una historia completa del álgebra desde sus orígenes, pero siempre 'desde mi punto de vista'." Y si ya en obra precedente había presentado la "prehistoria" de álgebra y la geometría desde el neolítico hasta el matemático hindú Brahmagupta –del s. VII– en la presente lo hace desde Al-Khwarizmi hasta Emmy Noether. El matemático árabe, porque es el primer autor de un "álgebra"; la matemática alemana, porque fue su auténtica maestra, en una labor que culmina en los entornos de 1930, precisamente en los que posibilitaron la plasmación de su libro de texto.

Van der Waerden no hace, sin embargo, una historia completa del álgebra, sino que elige tres campos que estima esenciales: ecuaciones algebraicas, teoría de grupos y álgebras. Es una decisión que obliga a solapamientos, a vueltas... Así, cuando trata la historia de las ecuaciones algebraicas ha de hacer referencia a la obra de Gauss, Galois, Jordan, y ha de volver a Gauss cuando, en la segunda parte, trate de la teoría de grupos, parte en la que se llega a la obra de Elie Cartan o Weyl de los años veinte de este siglo, para volver atrás, a Hamilton o Grassmann al tratar de las álgebras y se tiene que mencionar, nuevamente, la obra de Cartan y Weyl...

La historia se convierte, desde este enfoque, en una historia temática interna a unos campos determinados del hacer algebraico. Y es claro que, desde esta visión, las interrelaciones que existen en la obra, por ejemplo, de un mismo matemático, quedan anuladas, lo mismo que la posible conexión de algunos temas. Es una historia interna, muy sectorizada. A pesar de lo cual la profundidad en algunos temas es absoluta, convirtiéndose algunos capítulos en auténticas monografías sobre un teorema, un libro, un matemático.

Por otro lado, es una decisión que, desde una perspectiva actual, se muestra consecuente con una visión del hacer matemático no de progreso lineal, sino de rupturas epistemológicas. Y ello porque si el álgebra se estimó como la teoría que versaba sobre la resolución de ecuaciones, a partir de los entornos de 1829 pasó a ser el estudio de las condiciones que debían cumplir las raíces de una ecuación para que ésta fuera resoluble. Inversión conceptual que conduce, obligatoriamente, a manejar el concepto de grupo o el de extensión algebraica de un cuerpo. Nueva inversión conceptual, y ya hacia 1870, los propios conceptos de grupo y de extensión algebraica de un cuerpo pueden independizarse de su origen y el algebrista pasa a considerar estructuras generales. El estudio de las cuales lleva a plantear como problemática la caracterización de álgebras en general. De esta forma el término "álgebra" va rompiendo sus referenciales, variando los mismos. Variación que, lúcidamente, van der Waerden ha expuesto en las tres partes en que escinde su historia.

Con la exposición de la obra de los "algebristas" árabes Al-Khwarizmi, ben Qurra y Omar Khayyam comienza la primera parte, la que trata de la resolución de las ecuaciones algebraicas. Apoyándose en los textos de estos autores, expone su teoría pero en lenguaje notacional actual y, en algunos casos, llega a realizar reconstrucciones estrictamente matemáticas no dadas por los autores estudiados para justificar los resultados obtenidos por éstos. Enfoque reconstructivo que aplica, igualmente, en el tratamiento del álgebra en Italia, donde llega, desde la obra de Fibonacci, a la resolución de las ecuaciones de tercer y cuarto grado. Ecuaciones cuyas resolventes vienen establecidas por los algebristas italianos que alcanzan el límite en esta labor, fracasando en la obtención de la resolvente de la ecuación de quinto grado. Tras el trabajo de los italianos son los matemáticos franceses, como Vieta, Fermat y Descartes quienes, entre otros logros, consiguen el paso de una notación cósica y en lenguaje natural a la notación que, prácticamente, se sigue hoy día.

Tras ellos, van der Waerden pasa a estudiar lo que considera los predecesores de Galois en dos capítulos: el cuarto esboza los trabajos de Waring, Vandermonde, Lagrange, Malfatti –muy olvidado en las historias al uso–, Ruffini, Cauchy y Abel; el capítulo quinto lo dedica a una exposición monográfica de las demostraciones dadas por Gauss del teorema fundamental del álgebra. Se llega, así, a Galois, a quien se consagra el capítulo sexto exponiendo, también en trabajo casi monográfico, su obra, así como un esbozo de algunos de sus continuadores inmediatos entre los que incluye, sorprendentemente, al italiano Betti. En este capítulo, y quizá por la figura excepcional del matemático francés, se esboza una breve biografía de Galois.

Con la obra de Abel y Galois culmina, precisamente, el proceso de resolución algebraica de ecuaciones en su tratamiento directo ya que el primero demuestra la imposibilidad de la resolución algebraica de la ecuación de quinto grado y hace que se invierta la problemática: si la resolución directa es imposible, entonces hay que dar la razón de esta imposibilidad. Y ésta es la obra de Galois: el enlace de las raíces de una ecuación con la teoría de grupos y la extensión de un cuerpo. Con ello, el tema central del álgebra pasa, de resolución de ecuaciones, a tratamiento de las condiciones que han de cumplir las raíces, a la noción de grupo.

Todavía la teoría de grupos queda ligada a las nociones de sustitución y permutación por un lado y, por otro, a los movimientos de un espacio euclídeo. Corresponde a Jordan la realización de todo un tratado sobre los grupos de movimientos y sus aplicaciones geométricas. Y van der Waerden dedica el capítulo séptimo a exponer el tratado de Jordan, matemático francés del que indica que fue en sus textos en los que toda su generación llegó a aprender matemática. Del *Tratado de sustituciones*, publicado en 1870 y que analiza capítulo a capítulo, afirmará: "Es una obra maestra de arquitectura matemática. La belleza del edificio construido por Jordan es admirable" (p. 117).

La obra de Jordan supone un cambio fundamental en el tratamiento de la teoría de grupos. De manejar los grupos de sustituciones se pasa a los grupos abstractos, lo que obliga, posteriormente, a trabajar sobre la estructura de los mismos, así como a manejar sus representaciones. De resolución de ecuaciones a un nuevo tema. Al que van der Waerden dedica la segunda parte, siguiendo el esquema conceptual antes indicado: el capítulo octavo trata de la primera teoría de grupos hasta que se esclarece su estructura; el noveno estudia los grupos no ya finitos, sino de transformaciones infinitesimales, y se expone la teoría de Sophus Lie. En esta segunda parte desearía destacar, por un lado, la exposición sobre la obra de Elie Cartan y la de Weyl, con el cambio de problemática que éste hace respecto del concepto de espacio; por otro, una desviación temática al exponer van der Waerden la obra de Hölder (1859-1937). Además de su obra algebraica, se esbozan los puntos de vista del matemático alemán sobre la filosofía de la matemática (p. 157), quizá porque los mismos no hayan sido muy difundidos. Honradamente, van der Waerden indica que esa breve exposición es una traducción libre del obituario que sobre Hölder realizara en 1938.

La tercera y última parte se dedica a las álgebras. Desde los puntos de vista de la originalidad, la información de primera mano, la escasa atención prestada en las historias a este tema, creo que constituye una de las zonas más interesantes del libro. En el capítulo 10 se traza un recorrido por el descubrimiento de las álgebras, empezando por el problema de los números complejos. Aquí, los parágrafos dedicados a la creación de los cuaterniones por Hamilton se me muestran como una pequeña obra maestra en la que se va poniendo de relieve el proceso creativo matemático, la lucha por la búsqueda de unas estructuras con las sugerencias, incluso, de espacios de más de tres dimensiones. Para ello, van der Waerden hace uso no sólo de los escritos matemáticos de Hamilton sino de las cartas que envía a su hijo. Y tras esta breve, pero creo que magistral pieza, pasa a los trabajos de Grassmann, Hankel, Clifford... hasta llegar a la teoría de los espinores de Dirac y de Weyl, sobre el electrón, con el empleo de las álgebras de Clifford para obtener representaciones matriciales de dos valores del grupo de rotaciones en *n* dimensiones.

En el capítulo 11 se desarrolla la estructura de álgebras; comienza con un parágrafo introductorio, muy breve, en el que se fijan notaciones y los conceptos clave en forma, por decirlo así, canónica, en exposición de libro de texto. Se muestra el resultado final del hacer creador matemático. Y el capítulo se

desarrolla con los trabajos de los matemáticos desde las primeras intuiciones hasta alcanzar esos resultados básicos. Trabajos que van desde finales del XIX hasta los realizados por Cartan, Wedderburn y la escuela de Emmy Noether, escuela en la que interviene, y muy activamente, el autor de este libro. Los tres últimos capítulos se dedican: uno a los caracteres de grupo –y se produce otro de los momentos descriptivos más interesantes para la creación matemática, centrado en la correspondencia de Frobenius con Dedekind, donde se culmina con la factorización del "grupo determinante"–, y otros dos sobre las teorías de representaciones, bien de grupos y álgebras finitos –donde destacan los trabajos de la escuela de Emmy Noether, y van der Waerden tiene que autocitarse–, bien de los grupos y las álgebras de Lie, distinguiendo aquí los métodos global propio de Cartan e infinitesimal propio de Weyl y von Neumann.

Obra de historia de la matemática por un matemático y, claramente, para matemáticos o para quienes tengan una cultura matemática, aunque van der Waerden, en ocasiones, facilite la lectura con demostraciones, proposiciones, definiciones... de alguno de los temas tratados. En esta obra no se entra en consideraciones sobre elementos tan queridos para los que no dominan la materia sobre la cual historiar, como los factores externos, sociológicos o políticos. En algunos pasajes, como los indicados de Hamilton o Frobenius, se pone al lector en comunicación con momentos creadores de conceptos, de teorías pero en vivo, en la pugna con las ideas auténticas, momentos de aprehensión siempre difícil. De lectura apasionante algunas veces, siempre técnica, esta historia del álgebra, y desde la especial óptica del autor, cubre sólo algunos temas de esa historia. Pero lo hace plenamente: rica en datos, enlaces, resúmenes de ensayos, libros, cartas... Historia de pequeñas monografías, en el fondo, que sin duda se convertirá en obra de referencia obligada. La edición, como todas las de Springer-Verlag, cuidada, a pesar de lo cual se introducen, en ocasiones, algunas erratas de imprenta, que no afectan a la comprensión de los textos. (J. de L.)

ZOOLOGÍA. CORDADOS, por W. Haswell y T. J. Parker. Editorial Reverté; Barcelona, 1987. Difícil resulta la tarea de compaginar en un mismo volumen los tres grandes bloques docentes que en la actualidad forman el temario de la zoología de cordados: la anatomía comparada, la sistemática y la biología del grupo. Por lo mismo, son contados los textos capaces de solucionar el problema satisfactoriamente. Así, la mayor parte de los manuales no son sino tratados de anatomía comparada, mientras que unos pocos son compendios sistemáticos y apenas tenemos alguna obra que pueda calificarse de biología estricta. Es éste un problema general, dado que la mayoría de los textos españoles son traducciones de obras extranjeras. Por otra parte, la rápida diversificación de la investigación en torno a los cordados augura una acentuación de esta tendencia.

Sorprende, por tanto, encontrarnos ahora con un libro como el que da pie a esta reseña. Se trata de una traducción del famoso *Textbook of Zoology*, editado por vez primera en 1898. Este manual fue ampliamente actualizado en 1958 por el profesor Marshall (7.ª edición) y lo es ahora de nuevo con motivo de su traducción al castellano por parte del profesor Nadal.

Muchas y muy didácticas son las aportaciones de este texto australiano que pasó inadvertido con frecuencia en el mercado internacional, quizá debido a su procedencia. Creemos que, ante todo, resuelve felizmente la disyuntiva relativa a la integración de los tres bloques docentes comentados al principio. El texto sigue una línea de desarrollo sistemático que arranca antes de los cordados con el filo de los hemicordados. Se trata de una sistemática exhaustiva que no sólo incluye todos los taxones hasta nivel de orden, sino que incorpora la sistemática de los grupos extinguidos. Esto resulta interesante, dado que los manuales de anatomía comparada destacan los enfoques descriptivos y funcionales en detrimento de los evolutivos y que el registro fósil de los cordados es de los más completos que conocemos. Es quizás aquí donde mejor se aprecia la ingente labor revisora realizada por J. Nadal con vistas a la actualización de la sistemática, especialmente en los grupos más conflictivos y confusos ("peces"). Sin duda, este esfuerzo redunda en la calidad didáctica del volumen. Además, el manual es también un completo texto de anatomía comparada estructurada sobre una triple vertiente: *a*) general, con un compendio inicial de morfología de casi cien páginas destinado a introducir el modelo de organización vertebrado; *b*) taxonómica, que introduce cada clase de vertebrados a través

de un animal-tipo, lo que constituye otra aportación de innegable valor pedagógico, y *c*) específica, que detalla para los distintos taxones mencionados, desde la especie al orden, los caracteres que los identifican y que sirven para contrastar, frente a la homogeneidad evidenciada en las secciones *a*) y *b*), alteraciones puntuales observadas frente a los patrones generales. Este tipo de exposición de "variaciones sobre un mismo tema" es el mejor modo, a nuestro entender, de asimilar la diversidad que caracteriza, no sólo a los cordados, sino al resto de los seres vivos.

Por último, el texto proporciona un análisis sucinto de la biología y ecología de los distintos grupos. Como en el caso de la sistemática, y a diferencia de otros manuales de contenido comparable, esta biología no queda circunscrita a las especies vivientes ya que, siempre que ello resultase efectivo, se han expuesto también nociones de paleobiología de grupos fósiles interesantes. (A. M.)

THE CORRESPONDENCE OF CHARLES DARWIN. Frederick Burkhardt y Sydney Smith (Edts.). Cambridge University Press, 1985 y 1986. Han aparecido ya los dos primeros volúmenes de la correspondencia de Darwin. El primero, publicado en 1985, cubre el período 1821-1836; el segundo, que vio la luz el año pasado, recoge el epistolario de 1837 a 1843.

Desde el nacimiento de la ciencia moderna, el género epistolar ha desempeñado un papel principalísimo en la maduración, contrastación y difusión de las teorías. Arquetípicas son las cartas de Descartes, el P. Mersenne y Leibniz, y también las de Pauli en tiempos más cercanos. La correspondencia de Darwin ha sido rastreada y compilada por Frederick Burkhardt y Sidney Smith, auxiliados por William Montgomery y David Kohn. Han recogido unas 14.000 cartas escritas por Darwin o remitidas a él. Ahora Cambridge University Press las va editando agrupadas en períodos que guardan cierta homogeneidad y sentido en la vida del naturalista británico. El lector interesado encontrará la relación de las mismas en otra obra de Burkhardt y Smith: *A Calendar of the Correspondance of Charles Darwin. 1821-1882* (Garland, N. Y., 1985).

A cada volumen precede el listado de las cartas, una introducción donde se justifica la periodización del mismo y una explicación de las pautas editoriales seguidas en abreviaturas, divisiones, notas, etcétera. El tomo primero contiene, además, un prólogo general. Cada carta lleva agregada, en notas, la información necesaria para su completa intelección. La obra, digámoslo cuanto antes, es un trabajo modélico de historia de la ciencia en el que los autores vienen empeñados desde 1974 y cuyos primeros frutos han merecido el aplauso unánime. No en vano permiten conocer el mundo interior y el círculo familiar de Darwin, por supuesto; también, la gestación de la geología y la biología moderna.

El primer volumen está dedicado a los años de formación de Darwin: sus primeros pasos en Shrewsbury, el bienio en la Facultad de Medicina de Edimburgo, los cursos de Cambridge y los cinco años de su viaje a bordo del *H.M.S. Beagle*, cuyo fin le abre las puertas de la comunidad científica inglesa. La última carta, fechada el 30 de diciembre de 1836, la remite el capitán Fitz Roy. En ella le llama, muy significativamente, "my good Philos". Darwin tiene 27 años. Con buen criterio, los autores han incorporado cuatro apéndices: en el primero detallan la cronología de los principales acontecimientos de ese período; en el segundo exponen las anotaciones del viaje (diario, registro animal, registro geológico, catálogos de especímenes); en el tercero, la tripulación del *Beagle* y empleo de la misma; en el cuarto, los libros que llevaba, y, por último, sus primeros apuntes sobre los arrecifes.

El segundo volumen es mucho más doctrinal. En esos seis años (1837-1843) publicará dos libros –*Journal of researches* y *The structure and distribution of coral reefs*– y una quincena de artículos y preparará la edición de *Zoology of the voyage of H.M.S. Beagle*. Sobre todo, madurará su teoría sobre la transformación de las especies. Darwin se ha convertido también en una autoridad respetada en el campo de la geología. La correspondencia adquiere aquí un valor extraordinario para la historia de las ideas: Henslow, Fox, Owen, Lyell, etcétera. También se incluyen varios apéndices, de los que merece destacarse el dedicado a la reproducción animal y a la vitalidad de las semillas.

La prolífica bibliografía en torno a Darwin podrá entrar ahora en unos cauces más firmes con la publicación completa de su correspondencia. Quizá sea éste el agradecido elogio que los autores esperan y que sería injusto regatearles. (L. A.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DEFENSA ESTRATEGICA Y ARMAS DE ENERGIA DIRIGIDA

WEAPONS IN SPACE, VOL. 1: CONCEPTS AND TECHNOLOGIES. *Daedalus*, vol. 114, n.º 2; primavera, 1985. Vol. 2: IMPLICATIONS FOR SECURITY. *Daedalus*, vol. 114, n.º 3; verano, 1985.

THE STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: PERCEPTION VS REALITY. Wolfgang K. H. Panofsky en *Physics Today*, vol. 38, n.º 6, págs. 34-45; junio, 1985.

STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE: THE POLITICS AND SCIENCE OF WEAPONS IN SPACE. Gerold Yonas en *Physics Today*, vol. 38, n.º 6, págs. 24-32; junio, 1985.

EL GRANDIOSO DESFILE DE LAS GALAXIAS

EVIDENCE FOR LOCAL ANISTROPY DE THE HUBBLE FLOW. Marc Davis y P. J. E. Peebles en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 21, págs. 109-130; 1983.

A DISTANCE SCALE FROM THE INFRARED MAGNITUDE/H I VELOCITY-WIDTH RELATION, V: DISTANCE MODULI TO 10 GALAXY CLUSTERS, AND POSITIVE DETECTION OF BULK SUPERCLUSTER MOTION TOWARD THE MICROWAVE ANISOTROPY. M. Aaronson, G. Bothun, J. Mould, J. Huchra, R. A. Schommer y M. E. Cornell en *The Astrophysical Journal*, vol. 302, 1.ª parte, n.º 2, págs. 536-563; 15 de marzo de 1986.

SPECTROSCOPY AND PHOTOMETRY OF ELLIPTICAL GALAXIES: A LARGE-SCALE STREAMING MOTION IN THE LOCAL UNIVERSE. Alan Dressler, S. M. Faber, David Burnstein, Roger L. Davies, Donald Lynden-Bell, R. J. Terlevich y Gary Wegner en *The Astrophysical Journal*, vol. 313, n.º 2, 2.ª parte, págs. L37-L42; 15 de febrero de 1987.

RETROTRANSCRIPCION

REPLICATION OF THE GENOME OF A HEPATITIS B-LIKE VIRUS BY REVERSE TRANSCRIPTION OF AN RNA INTERMEDIATE. J. Summers y W. S. Mason en *Cell*, vol. 29, n.º 2, págs. 403-415; junio, 1982.

TY ELEMENTS TRANSPOSE THROUGH AN RNA INTERMEDIATE. J. D. Boeke, D. J. Garfinkel, C. A. Styles y G. R. Fink en *Cell*, vol. 40, n.º 3, págs. 491-500; marzo, 1985.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF HEPATITIS B VIRUSES. D. Ganem y H. E. Varmus en *Annual Review of Biochemistry*, volumen 56, páginas 651-693; 1987.

ELECTRUROS

CESIUM 18-CROWN-6 COMPOUNDS. A CRYSTALLINE CESIDE AND A CRYSTALLINE ELECTRIDE. Ahmed Ellaboudy, James L. Dye y Patrick B. Smith en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 105, n.º 21, págs. 6490-6491; 19 de octubre de 1983.

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ALKALIDES AND ELECTRIDES. J. L. Dye y M. G. DeBacker en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 38, págs. 271-301; 1987.

MIMETISMO VEGETAL

MIMICRY IN PLANTS. Delbert Wiens en *Evolutionary Biology*, vol. 11, págs. 365-403; 1978.

CROP MIMICRY IN WEEDS. Spencer C. H. Barrett en *Economic Botany*, vol. 37, n.º 3, págs. 255-282; julio-septiembre, 1983.

MIMICRY AND DECEPTION IN POLLINATION. A. Dafni en *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 15, págs. 259-278; 1984.

CORREDOR SWAHILI

EARLY SEAFARERS OF THE COMORO ISLANDS: THE DEMBENI PHASE OF THE IXTH-XTH CENTURIES AD. Henry T. Wright en *Azania*, vol. 19, págs. 13-59; 1984.

THE SWAHILI: RECONSTRUCTING THE HISTORY AND LANGUAGE OF AN AFRICAN SOCIETY, 800-1500. Derek Nurse y Thomas Spear. University of Pennsylvania Press, 1985.

ASIATIC COLONISATION OF THE EAST AFRICAN COAST: THE MANDA EVIDENCE. Mark Horton en *Journal of the Royal Asiatic Society of Britain & Ireland*, n.º 2 para 1986, págs. 202-213; 1986.

COMO APRENDEN LAS PALABRAS LOS NIÑOS

THE ACQUISITION OF THE MEANING OF COLOR TERMS: A STUDY OF LEXICAL DEVELOPMENT. Elsa J. Bartlett en *Proceedings of the Stirling Conference on the Psychology of Language*, dirigido por P. Smith y R. Campbell. Plenum Press, 1977.

DICTIONARIES IN THE MIND. George A. Miller en *Language and Cognitive Processes*, vol. 1, n.º 3, págs. 171-185; Spring, 1986.

THE NATURE OF VOCABULARY ACQUISITION. Dirigido por Margaret G. McKeown y Mary E. Curtis. Lawrence Erlbaum Associates, 1987.

FIJACION BIOLOGICA DEL NITROGENO

SIMBIOSIS RHIZOBIUM-LEGUMINOSA. C. Azcón González de Aguilar, J. M. Barea y J. Olivares en *Investigación y Ciencia*, n.º 82, págs. 84-93, 1983.

MOLYBDENUM IN NITROGENASE. V. K. Shah, R. A. Ugalde, J. Imperial y W. J. Brill en *Annual Review Biochemistry*, 53: págs. 231-257; 1984.

NITROGEN FIXATION AND CO_2 METABOLISM. Dirigido por P. W. Ludden y J. R. Burris. Elsevier. 1985.

MECANISMO DE NODULACIÓN DE LAS LEGUMINOSAS. G. SOBERÓN en *Investigación y Ciencia*, n.º 106, págs 6-13; 1985.

NITROGEN FIXATION WITH NON-LEGUMES. Dirigido por F. A. Skinner y P. Uomala. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, 1986.

REGULATION OF NITROGEN FIXATION GENES. G. N. Gussin, C. W. Ronson y F. M. Ausubel en *Annual Review Genetics*, págs. 567-591; 1986.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE EFFECTS OF PERSONAL SPACE AND TERRITORY ON HUMAN COMMUNICATION. E. T. Hall en *Nonverbal Communication in Human Interaction*, dirigido por Mark L. Knapp. Holt, Rinehart and Winston, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

STABILITY OF FLUID INTERFACES OF REVOLUTION BETWEEN EQUAL SOLID CIRCULAR PLATES. R. D. Gillette y D. C. Dyson en *The Chemical Engineering Journal*, vol. 2, n.º 1, págs. 44-54; enero, 1971.

STABILITY AND OSCILLATIONS OF A SOAP FILM: AN ANALYTIC TREATMENT. Loyal Durand en *American Journal of Physics*; abril, 1981.